

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СОЮЗА ССР

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ТРЕСТ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И РАЦИОНАЛИЗАЦИИ РАЙОННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И СЕТЕЙ „ОРГРЭС“

ИСПЫТАНИЕ ПАРОВЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Г
И
З
Д
А
Н
И
Е



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

WWW.03-TS.RU

Автор инж. М. А. УХОБОТИН
Редактор инж. А. К. КИРШ

52298

4
9
3
36
36
30
42
42
4
44

Редактор И. Л. Изящин

Техн. редактор А. М. Фредкин

Сдано в набор 23/VI 1952 г.

Подписано к печати 20/IX 1952 г.

Бумага 60X92¹/₁₆

6 л. л. + 1 вклейка

Уч.-изд. л. 7,7.

T-07085

Тираж 4 000 экз.

Заказ № 3232

Цена 3 р. 85 к. (номинал по прейскуранту 1952 г.)

Типография Госэнергоиздата, Москва, Шлюзовая наб., 10.

В. А. Мухоморов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Рациональная эксплуатация паротурбинных установок возможна лишь при наличии достоверных, основанных на испытаниях, тепловых характеристик турбоагрегатов, позволяющих достаточно обоснованно нормировать работу турбин.

«Инструкция по проведению эксплуатационного испытания паровых турбин на электростанциях» (Госэнергоиздат, 1948) предусматривает весь комплекс работ, связанных с проведением испытания, от составления программы до оформления результатов для получения типовых энергетических характеристик и построена в виде конкретного примера, применительно к турбинам типа АП-25-1 ЛМЗ.

Однако при испытании турбин иного типа, с иной тепловой характеристикой, у работников станций и служб наладки, производящих испытания, возникает ряд практических вопросов, связанных с выбором программы, выбором схемы измерений, методом и т. п. применительно к данной конкретной установке. И на существующая работа дает в развитие упомянутой инструкции принципиальных положений, которые позволяют работникам станций и служб наладки самостоятельно решать основные вопросы, возникающие при проведении испытания турбин. И в данной работе, в частности, рассматривается вопрос о рациональной методике проведения испытаний и измерений и даны необходимые конкретные указания, цель которых возможно упростить эксперимент, не снижая точности результатов. Изложение хода и приемов обработки результатов испытания сопровождается численными примерами.

В отличие от инструкции в работе приводится уточненная методика приведения результатов испытаний к номинальным параметрам, при которой в основу пересчета положены условия неизменного открытия регулирующих клапанов.

В работе рассматривается упрощенный способ построения диаграммы режимов, изложенный в инструкции и применяемый ОРГРЭС при эксплуатационных испытаниях.

По всем вопросам, связанным с практическим использованием данной работы, просим обращаться по адресу: Москва 5, Кукуйский пер., д. 4, ОРГРЭС

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	5

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

I. Основные характерные зависимости в паровой турбине	7
1. Связь расхода пара и мощности для конденсационной турбины	7
2. Виды связи расхода пара и мощности для конденсационной турбины	8
3. Связь расхода пара и мощности для турбины с одним регулируемым отбором	11
4. Зависимость изменения мощности от давления отработавшего пара	13
II. Программа испытаний	13
1. Общие положения	13
2. Опыты для определения характеристики машины при конденсационном режиме	15
3. Опыты для определения характеристики ч. в. д.	16
4. Опыты при переменном вакууме	17
III. Выбор метода проведения испытаний	17
IV. Схема работы турбоагрегата при испытаниях	23
1. Тепловая схема	23
2. Схема определения основных параметров работы установки	24
3. Особенности тепловой схемы при проведении опытов при переменном вакууме	25
4. Измерение температуры отработавшего пара ч. в. д.	25
V. Подготовительные работы к испытанию	25
1. Общие указания	25
2. Расходный баланс установки	25
3. Параметры пара и воды	25
4. Работа системы парораспределения	25
5. Работа вспомогательного оборудования	25
VI. Применяемые приборы и их установка	25
VII. Требования к установке перед испытанием	25
VIII. Проведение испытаний	25
1. Подготовка персонала и пробный опыт	25
2. Тарировка диафрагм на паропроводе	25
3. Проведение опытов по программе	25

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

I. Обработка первичных данных	47
1. Просмотр журналов наблюдений, разметка	47
2. Подсчет средних величин и поправки	47
3. Определение состояния пара и воды	51
4. Подсчет расхода при измерении дроссельным прибором	51
5. Расходный баланс установки	55
II. Приведение результатов испытаний к номинальным условиям и построение зависимости расхода пара от мощности	56
1. Конденсационный турбоагрегат с регенерацией	56
2. Турбоагрегат с одним регулируемым отбором пара	74
III. Работа парораспределения и давление в промежуточных ступенях турбины	88
IV. Характеристика работы вспомогательного оборудования	96
Приложение. Графики и таблицы для организации измерения и недочета расхода пара и воды с помощью нормальных сопел и диафрагм	92

Истор
о в на
я 60X
5



ВВЕДЕНИЕ

В результате теплового испытания парового турбогенератора должна быть получена, во-первых, характеристика работы его в объеме, достаточном для планирования, а, во-вторых, по возможности, все данные для суждения о совершенстве работы собственно машины, вспомогательного оборудования и тепловой схемы в целом.

Естественно, что чем детальнее картина работы всей установки, получаемая в результате испытания, тем легче судить о возможной рационализации и усовершенствовании этой установки. Рационализация и усовершенствование работы схемы являются важным обстоятельством, которое обязательно должно учитываться при проведении испытания.

Установленная Министерством электростанций система раздельного планирования и нормирования расхода тепла (топлива) на выработку электроэнергии по конденсационному циклу и на тепловом потреблении достаточно четко определяет минимальные требования к программе испытания.

На основании испытания должны быть получены характеристики, которые позволяли бы осуществить такое раздельное планирование и нормирование.

Экономичность парового турбогенератора определяется расходом тепла на выработку 1 *квтч* электроэнергии.

Для определения расхода тепла на выработку электроэнергии необходимо знать весовой расход пара в зависимости от мощности на зажимах генератора, а также количество расходуемого в схеме турбогенератора (и возмещаемого в котле) тепла на каждый килограмм пара.

Расходуемое в схеме турбогенератора тепло в *ккал/кг* определяется как разность теплосодержания пара при входе в турбину и конденсата при выходе из конденсатора или питательной воды после последнего по ходу питательной воды регенеративного подогревателя. Эта разность теплосодержания называется теплоиспользованием пара.

При постоянном теплосодержании пара перед турбиной (неизменные начальные параметры) величина теплоиспользования при изменении расхода пара изменяется вследствие того, что

теплосодержание питательной воды не остается постоянным. При отсутствии регенерации она меняется в соответствии с изменением давления отработавшего пара, а при наличии регенерации вследствие изменения давления пара в регенеративных отборах.

Следовательно, для возможности правильного нормирования работы турбоагрегата необходимо иметь характеристики, позволяющие определить весовой расход пара и величину теплоиспользования его для заданного режима (мощности, регулируемого отбора и параметров процесса).

Получение этих данных из опыта и является основной задачей испытания турбоагрегата.

Зависимость температуры (теплосодержания) питательной воды от расхода свежего пара, определяющая величину теплоиспользования пара, получается в ходе испытания без особых затруднений. Основная сложность испытания заключается в получении возможно более точной связи расхода пара и мощности. Разрешение этого вопроса и является задачей данной работы. Методика подсчета расхода тепла регламентируется соответствующими инструкциями Технического управления МЭС. Достаточно подробно этот вопрос разбирается также в специальной литературе (см. например, А. С. Горшков, Технико-экономические показатели тепловых электрических станций, ГЭИ, 1949).

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ

I. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ В ПАРОВОЙ ТУРБИНЕ

1. Связь расхода пара и мощности для конденсационной турбины

Графическое и аналитическое выражение этой связи определяется системой парораспределения машины.

В общем виде графически эту зависимость принято выражать некоторой ломаной линией, отсекающей на оси расхода при нулевой мощности некоторую величину, называемую расходом холостого хода.

Аналитическое выражение этой зависимости соответственно имеет вид:

$$D_0 = D_{x.x} + bN_s + b'(N_s - N'_s) + b''(N_s - N''_s) + \dots + b^n(N_s - N^n_s);$$

здесь D_0 — часовой расход пара, $m/час$;

$D_{x.x}$ — часовой расход пара на холостой ход, $m/час$;

N_s — мощность на зажимах генератора, тыс. $квт$;

N'_s, N''_s, N^n_s — мощность на зажимах генератора в точках первого, второго и n -ного излома, тыс. $квт$;

b — дополнительный удельный расход пара в диапазоне мощности от нулевой до первого излома линии зависимости расхода пара от мощности N_s , $m/тыс. квтч$;

b' — разность дополнительных удельных расходов в диапазонах мощности $N'_s - N''_s$ и $0 - N'_s$, $m/тыс. квтч$;

b'' — разность дополнительных удельных расходов в диапазонах мощности $N''_s - N^n_s$ и $N'_s - N''_s$, $m/тыс. квтч$;

b^n — разность дополнительных удельных расходов в диапазонах мощности $N^n_s - N^n_s$ и $N'_s - N^n_s$, $m/тыс. квтч$.

Для заданной конкретной машины входящие в приведенное уравнение величины расхода холостого хода и дополнительных удельных расходов могут изменяться в зависимости от изменения параметров процесса расширения пара в турбине и условий работы регенеративной установки (в том случае, если она имеется).

Наибольшее влияние на зависимость расхода пара от мощности оказывает изменение давления отработавшего пара, определяемое сезонными изменениями температуры охлаждающей воды и достигающее значительных величин. Возможные отклонения начальных параметров пара от номинальных значений и условий работы регенеративной установки от нормальных, как правило, невелики, влияние их также незначительно и поддается достаточно точному учету. Следовательно, основной задачей испытания является:

а) Получение зависимости расхода пара от мощности при номинальных (или принятых в эксплуатации за номинальные) параметрах свежего пара при нормальных условиях работы регенеративной установки.

б) Получение поправочной кривой на давление отработавшего пара в конденсаторе, с помощью которой зависимость расхода пара от мощности может быть пересчитана на любое установившееся в зависимости от температуры и расхода охлаждающей воды давление в конденсаторе.

2. Виды связи расхода пара и мощности для конденсационной турбины

Внешний вид этой связи определяется типом парораспределения, т. е. характером изменения потери адиабатического перепада в регулирующих органах от расхода пара.

При дроссельном парораспределении потеря перепада связана с расходом пара практически линейно. Зависимость расхода пара от мощности также выражается прямой линией (фиг. 1), аналитическое выражение которой будет:

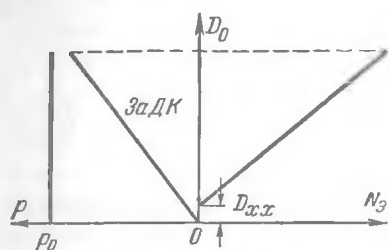
$$D_0 = D_{x,x} + bN_p;$$

здесь и далее в левой половине графика представлен характер изменения давления пара за регулируемыми клапанами, в частности, на фиг. 1 показано давление за дроссельным клапаном.

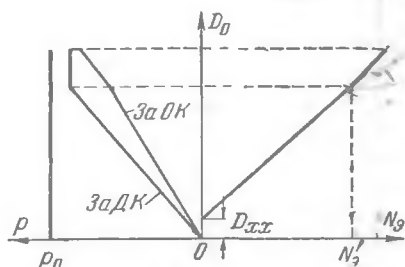
Комбинация дроссельного клапана с перегрузкой посредством обвода группы первых ступеней придает характеристике вид ломаной линии, причем излом ее соответствует моменту включения в работу обводного клапана (фиг. 2). В этом случае:

$$D_0 = D_{x,x} + bN_p + b'(N_p - N'_p).$$

После полного открытия дроссельного клапана начинает открываться обводной клапан. Более крутое протекание линии давления за обводным клапаном объясняется тем, что поток пара, поступающий через обводной клапан, имеет температуру, значительно более высокую, чем основной поток пара, проходящий через эту ступень.



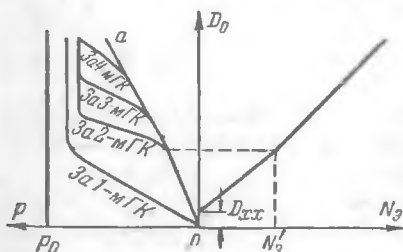
Фиг. 1. Характеристика турбины с дроссельным парораспределением.
ДК — дроссельный клапан.



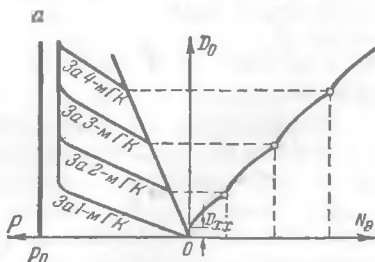
Фиг. 2. Характеристика турбины при дроссельном парораспределении с перегрузкой обводом.
ОК — обводной клапан.

Аналогичный вид имеет характеристика при сопловом регулировании, когда сопловые сегменты неодинаковы по пропускной способности (например, первый сегмент при полном открытии первого клапана пропускает 40 % номинального расхода пара, второй, третий и четвертый сегменты при открытых соответствующих клапанах доводят расход пара до 100 %, фиг. 3).

На левой половине диаграммы показан характер изменения давления за регулируемыми клапанами. Линия *a* соответствует давлению в камере регулирующей ступени.



Фиг. 3. Характеристика турбины при сопловом парораспределении (неравные по пропуску сегменты).
ГК — групповой клапан.



Фиг. 4. Характеристика турбины при сопловом парораспределении (равные по пропуску сегменты).
ГК — групповой клапан.

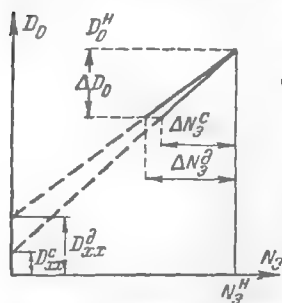
В случаях, когда регулирование количества подводимого пара осуществляется группой клапанов, управляющих подводом пара, к равным по пропускной способности сопловым сегментам, характеристика имеет вид волнообразной линии, несколько утрированно показанной на фиг. 4. Причиной такого характера

зависимости $D_0 = f(N)$ является нелинейный характер изменения потерь пара при впуске от расхода свежего пара.

Волнообразность связи D_0 и N_s при парораспределении данного типа будет тем заметнее, чем при прочих равных условиях:

- меньше общее число сопловых групп;
- меньше перекрытие клапанов;
- больше доля располагаемого перепада, приходящегося на регулируемую ступень;
- выше к. п. д. регулирующей ступени.

Следует сказать, что такой характер зависимости $D_0 = f(N_s)$ для конденсационной машины экспериментально удается установить редко. Однако излом линии зависимости в точке включения в работу второго группового клапана имеет место всегда при отсутствии сколь-



Фиг. 5. Характеристики турбин с сопловым и дроссельным парораспределением

$$\Delta N_s^c < \Delta N_s^d; b^c > b^d;$$

$$D_{xx}^c < D_{xx}^d.$$

либо значительной перекрыши клапанов. В то же время, если мощность при полностью открытом первом групповом клапане меньше минимальной по программе испытания — полученная зависимость мощности от расхода пара будет выражаться уравнением прямой линии.

Относительно величины расхода холостого хода необходимо отметить следующее: входящий в уравнение характеристики расход холостого хода является условной величиной и может быть неравен истинному расходу на холостой ход.

Условная величина расхода на холостой ход необходима для удобства аналитического выражения зависимости $D_0 = f(N_s)$ и находится экстраполяцией прямо-

мого участка этой зависимости в пределах опытных точек до оси ординат.

Величина дополнительного удельного расхода b определяется на основании тех же экспериментальных данных и, следовательно, соответствует экстраполированному расходу холостого хода.

Влияние типа парораспределения на величину дополнительного удельного расхода и расхода холостого хода понятно из следующего рассуждения.

Пусть две чисто конденсационных турбины работают равно экономично при номинальной мощности с расходом пара D_0^N (фиг. 5). Параметры свежего и отработавшего пара и номинальная мощность этих турбин одинаковы. Парораспределение одной турбины сопловое, другой — дроссельное. При равном уменьшении расхода пара ΔD_0 мощность для турбины с сопловым парораспределением сократится на меньшую величину. Несколько упрощая, можно это явление объяснить тем, что для турбины с дроссельным парораспределением, кроме расхода пара, сократится

также и располагаемый перепад тепла за счет увеличения потери в дроссельном клапане. Таким образом, для турбины с сопловым парораспределением установится большая мощность, для турбины с дроссельным — меньшая.

Поскольку расход пара уменьшен на одинаковую величину, дополнительный удельный расход для соплового парораспределения будет больше, для дроссельного — меньше.

Расход холостого хода, как это видно из фиг. 5, будет больше для турбины с дроссельным парораспределением.

3. Связь расхода пара и мощности для турбины с одним регулируемым отбором

При наличии регулируемого отбора связь расхода свежего пара и мощности не может быть выражена так просто, как для конденсационной турбины. Поскольку мощность есть функция расхода пара через часть высокого и часть низкого давления, то она зависит от расхода свежего пара и от расхода пара в отбор.

Эта связь выражается диаграммой режимов (фиг. 6), где мощность определяется в зависимости от расхода свежего пара (расхода через часть высокого давления) и расхода в отбор (определяющего при заданном расходе свежего пара расход в ч. н. д.).

Поле диаграммы режимов в координатах D_0 — N_2 ограничено следующими линиями:

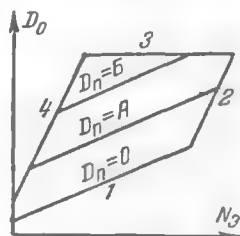
1. Линия режима турбины без отбора $D_n = 0$ соответствует конденсационному режиму при включенном регуляторе давления. Из всех возможных режимов при заданной мощности этот режим характеризуется наименьшим расходом пара.

2. Линия максимальной мощности при заданном отборе соответствует максимальному расходу пара в ч. н. д. турбины и меняющемуся в зависимости от отбора расходу через ч. в. д.

3. Линия максимального расхода в ч. в. д. соответствует изменяющемуся в пределах от максимума до минимума расходу в ч. н. д. при постоянном расходе свежего пара.

4. Линия минимального расхода в ч. н. д. (из условий вентиляции ее) является в противовес линии 2 линией минимальной мощности при заданном расходе пара в отбор и характеризует режимы с максимальным удельным расходом пара при данной мощности.

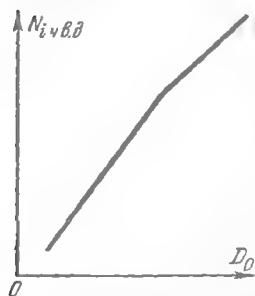
Если построение связи расхода пара и мощности для конденсационной турбины возможно в результате проведения опытов по довольно простой программе и сравнительно несложной обработки данных испытания, то построение диаграммы режимов для турбины с одним регулируемым отбором таким методом (по



Фиг. 6. Диаграмма режимов турбины с одним регулируемым отбором.

опытным точкам) весьма неудобно. Требуется проведение большого числа опытов, весьма точное выдерживание постоянства расхода пара регулируемого отбора по сериям опытов, что усложняет и затягивает испытание. Обработка такого испытания громоздка, приближенна и не обеспечивает достаточной точности диаграммы режимов.

В практике ОРГРЭС применяются два метода построения диаграммы режимов на основе экспериментальных данных. Один из них основан на характеристиках отдельных частей турбины. Турбина с регулируемым отбором рассматривается как две турбины: противодавленческая, работающая на перепаде от да-



Фиг. 7. Характеристика ч. в. д.

вления свежего пара до давления в регулируемом отборе, и конденсационная, работающая на перепаде от давления в отборе до давления в конденсаторе. Этот метод отличается высокой точностью, но довольно сложен.

Несколько менее точный, но более простой способ основан на использовании для построения диаграммы характеристики ч. в. д. (от стопорного клапана до камеры регулируемого отбора) и характеристики машины при режиме без регулируемого отбора с включенным регулятором давления. Несмотря на

пониженную по сравнению с первым методом точность, этот способ точнее и значительно проще, чем метод построения диаграммы по опытным точкам. В излагаемом далее материале разбирается именно этот метод.

Внешний вид характеристики ч. в. д. $D_0 = f(N_{i.v.d.})$ подобен рассматривавшимся ранее видам зависимости $D_0 = f(N_p)$ для конденсационной турбины с той лишь разницей, что работа парораспределения здесь всегда отражается более заметно.

Это понятно, если учесть, что относительная величина теплового перепада регулирующей ступени по сравнению с общим перепадом сильно возрастает в связи с тем, что общий перепад в этом случае определяется не давлением в конденсаторе, а давлением в регулируемом отборе. Графически характеристика ч. в. д. изображается обычно таким образом, что по оси абсцисс откладывается расход свежего пара D_0 , а по оси ординат — внутренняя мощность ч. в. д. (фиг. 7).

Как будет показано далее, характеристика ч. в. д. определяется из опытов расчетом, исходя из величины использованного перепада тепла и расхода пара через ч. в. д. Используемый перепад определяется по измеренным в опытах параметрам свежего пара и пара в камере отбора (давление и температура).

Не исключено, что подлежащая испытанию машина имеет в камере регулируемого отбора при некоторых режимах влажный пар. В этом случае необходимо создать такой режим машины, при котором пар регулируемого отбора будет перегретым.

Наиболее радикальным путем в этом случае является проведение испытания при пониженном начальном давлении и максимально допустимой температуре свежего пара.

4. Зависимость изменения мощности от давления отработавшего пара

В настоящее время принято оценивать влияние переменного давления в конденсаторе на экономичность турбогенератора с помощью «сетки поправок на вакуум» (фиг. 8), выражающей изменение мощности от давления отработавшего пара для различных постоянных величин расхода пара.

Этот метод был в свое время предложен работниками ЛМЗ им. Сталина, инж. А. С. Зильберманом и инж. Г. С. Смоляровым (журнал «Теплосиловое хозяйство», № 7, 1939) и в силу своей чрезвычайной наглядности и простоты получил широкое распространение. Методика расчетного определения «сетки поправок на вакуум» изложена инж. А. С. Зильберманом в журнале «Советское котлотурбостроение» № 2 за 1945 г.

Нижняя точка перегиба кривых сетки соответствует предельному вакууму турбины, т. е. тому давлению отработавшего пара при данном расходе пара в конденсатор, при котором достигнута критическая скорость пара в выходном сечении рабочих лопаток последней ступени.

На фигуре пунктиром показано, что для заданного расхода пара изменение мощности при изменении давления отработавшего пара от p_2' до p_2'' следует оценить по кривой $D_{ч.н.д.}$, отвечающей расходу в ч. н. д. при этом режиме. Следует подчеркнуть, что точки a и b лежат на одной кривой.

При постоянной мощности изменение расхода пара:

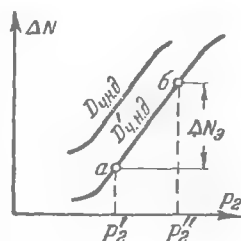
$$\Delta D_0 = \Delta N \cdot b,$$

где ΔN — изменение мощности, взятое по сетке поправок, тыс. квт;
 b — дополнительный удельный расход пара, т/тыс. квтч.

II. ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЯ

1. Общие положения

Программа испытания конденсационного турбоагрегата должна быть составлена таким образом, чтобы на основании проведенных опытов можно было получить зависимость расхода свежего пара от мощности.



Фиг. 8. Сетка поправок на вакуум.

Программа испытания турбины с регулируемым отбором должна предусматривать возможность получения и характеристики конденсационного режима с включенным регулятором давления и характеристики ч. в. д. — зависимости внутренней мощности ч. в. д. от расхода свежего пара, которые позволяют построить общую диаграмму режимов турбины.

Для обоих типов турбин, кроме того, должны быть проведены опыты при переменном вакууме для построения сетки поправок на вакуум.

Перечень режимов машины при проведении испытания составляется, исходя из данных, положенных в основу проектирования агрегата, типа парораспределения, а также пределов расхода пара, конденсата и питательной воды, в которых возможно надежное измерение с помощью ртутных дифференциальных манометров. Ниже дается образец такого перечня, по аналогии с которым может быть составлена программа испытаний для любой конкретной машины.

В качестве примера взята машина с регулируемым теплофикационным отбором пара, работающая в зимнее время с регулируемым отбором и в летнее — как конденсационная.

Подлежащая испытанию машина выполнена в двух цилиндрах с регулируемым отбором после цилиндра высокого давления. Система парораспределения — дроссельный клапан, обеспечивающий пропуск свежего пара 60% максимального, и два последовательно включающихся обводных перегрузочных клапана (в разные ступени ч. в. д.). При полностью открытом первом обводном клапане расход свежего пара составляет 75% от максимального. Этот расход соответствует номинальной мощности N_s^* при режиме без регулируемого отбора; экономическая мощность $N_s^{э}$ при этом режиме обеспечивается дроссельным клапаном при закрытых обводных клапанах.

Подвод пара первой ступени ч. в. д. осуществлен по всей окружности, постоянное давление в регулируемом отборе поддерживается дроссельным перепускным клапаном.

Система парораспределения части высокого давления определяет три характерных зоны работы турбины:

1) зона работы дроссельного клапана; 2) зона работы первого обводного клапана и 3) зона работы второго обводного клапана.

Граничными точками этих зон (в сторону увеличения расхода свежего пара) будут, соответственно, являться:

1) полностью открытый дроссельный клапан при закрытых обводных клапанах;

2) полностью открытый первый обводной клапан при закрытом втором обводном и

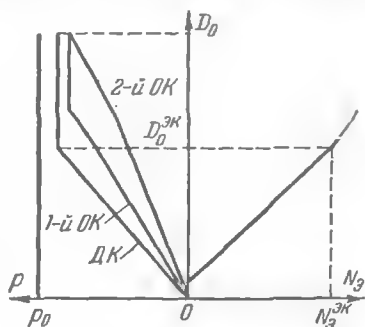
3) полностью открытый второй обводной клапан (если по поводу этого режима нет особых указаний в технических условиях на поставку машины или специальных указаний завода)

2. Опыты для определения характеристики машины при конденсационном режиме

В этом разделе дается рациональная программа опытов для определения характеристики конденсационного режима турбины с регулируемым отбором пара.

Приведенный перечень необходимых опытов при конденсационном режиме с отключенным регулятором давления (п. 1, табл. 1 и 2) соответствует программе опытов для конденсационной турбины без регулируемого отбора.

Характеристика конденсационного режима в большей своей части находится в пределах первой зоны и в этих пределах прямолинейна. Участок ее от $N_3^{ЭК}$ до N_3^H также практически прямолинейен, но вся характеристика имеет излом при $N_3^{ЭК}$ (фиг. 9).



Фиг. 9. Диаграмма работы парораспределения и характеристика турбины при конденсационном режиме.

ОК — обводной клапан.

Наиболее целесообразной является программа, соответствующая минимальному количеству опытов, приведенная в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п.	Режим	Мощность генератора				
		$0,6 N_3^{ЭК}$	$0,75 N_3^{ЭК}$	$N_3^{ЭК}$	$\frac{N_3^{ЭК} + N_3^H}{2}$	N_3^H
1	Конденсационный режим при отключенном регуляторе давления	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт
2	То же, при включенном регуляторе давления	2 опыта	1 опыт	2 опыта	1 опыт	1 опыт

При такой программе обе прямых, составляющих зависимость $D_0 = f(N_3)$ для каждого режима, получаются на основании трех точек (точка $N_3^{ЭК}$ — общая для обоих отрезков).

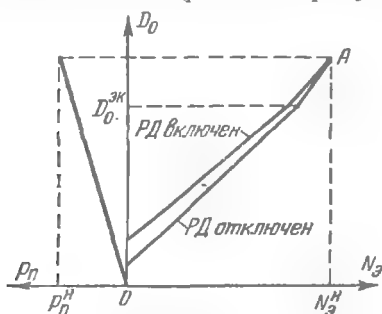
Дублированные точки при режиме с включенным регулятором давления намечены по соображениям обеспечения надежности результатов опытов.

В большом числе машин с регулируемым отбором парочная часть низкого давления выполняется так, что при режиме без отбора и номинальной мощности давление в камере отбора устанавливается равным номинальному (точка А, фиг. 10). Поэтому опыт при номинальной мощности и включенном регуляторе дав-

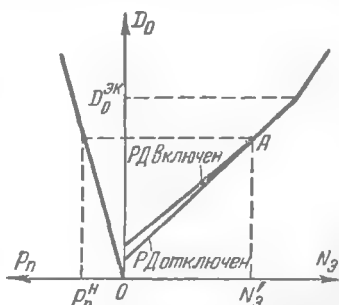
ления не дублируется. Нанесенные на одном графике характеристики $D_0 = f(N_s)$ для режимов с отключенным и включенным регулятором давления для этого случая будут приблизительно иметь вид, аналогичный кривым фиг. 10.

Обе характеристики имеют излом при расходе пара, соответствующем полному открытию дроссельного клапана (точнее, предельному расходу пара через сопла первой ступени ч. в. д.) при номинальных параметрах свежего пара.

Существуют, однако, машины, у которых при режиме без отбора номинальное давление в регулируемом отборе при условии полного открытия перепускных клапанов в часть низкого



Фиг. 10. Характеристики турбины при конденсационном режиме, при включенном и выключенном регуляторе давления в отборе.
РД — регулятор давления.



Фиг. 11. Характеристика турбины при конденсационном режиме, при включенном и выключенном регуляторе давления в отборе (номинальный пропуск пара ч.в.д. при повышенном давлении пара в регулируемом отборе).
РД — регулятор давления.

давления достигается при расходе в ч. н. д., меньше, чем расход, соответствующий номинальной мощности при конденсационном режиме. В этом случае совмещение характеристик конденсационного режима с отключенным и включенным регулятором давления произойдет не при номинальной мощности, как показано на фиг. 10 (точка А), а при соответственно меньшей N_s' (фиг. 11).

Для такой машины участок характеристики при значениях мощности более N_s' , соответствующей точке А (фиг. 11), общий как для отключенного, так и для включенного регулятора давления (при условии установки его на номинальное давление). Поэтому программу опытов следует принять, как показано в табл. 2 (см. стр. 17).

3. Опыты для определения характеристики ч. в. д.

Характеристика ч. в. д. может быть получена в результате проведения опытов с регулируемым отбором. В некоторых случаях для построения ее могут быть использованы опыты без

Таблица 2

№ п/п.	Мощность генератора	0,6 N _в ^{ЭК}	Соответств. точке А	N _в ^{ЭК}	$\frac{N_{в}^{ЭК} + N_{в}^{Н}}{2}$	N _в ^Н
	Режим					
1	Конденсационный режим при отключении регулятора давления	1 опыт	2 опыта	2 опыта	1 опыт	2 опыта
2	То же, при включенном регуляторе давления	2 опыта	—	—	—	—

регулируемого отбора. Это возможно только в случае надежного измерения температуры пара за ч. в. д. (см. раздел IV, п. 4).

Положение парораспределительных клапанов свежего пара в опытах с отбором целесообразно взять то же, что и в опытах без регулируемого отбора и, сверх того, провести некоторое количество опытов в диапазоне изменения расхода свежего пара от соответствующего номинальной мощности при конденсационном режиме, до максимального, соответствующего полному открытию второго обводного клапана (табл. 3, см. стр. 18).

Для обеспечения более точного измерения температуры отработавшего пара ч. в. д. расход пара в отбор должен быть не менее 50% от расхода свежего пара в данном опыте.

Замечание относительно количества опытов:

1) В промежутке между соседними граничными точками желательно иметь минимум одну точку.

2) Две соседние опытные точки должны отличаться по расходу свежего пара не более чем на $0,1 \div 0,15 D_0^{\%}$.

3) При граничных режимах желательно проводить по два опыта.

4. Опыты при переменном вакууме

Построение «универсальной кривой», являющейся основой для вычисления «сетки поправок на вакуум», производится по данным обработки результатов двух серий опытов при постоянном расходе свежего пара для каждой серии (табл. 4, см. стр. 18).

«Сетка поправок на вакуум» должна охватывать круглогодовой диапазон изменения давления в конденсаторе, следовательно, это испытание должно проводиться в холодное время года при максимальном расходе охлаждающей воды.

III. ВЫБОР МЕТОДА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ

При испытании паровых турбин на электростанциях практически неизбежны колебания параметров и отклонение средней за опыт величины этих параметров от номинальных значений.

Как следствие этого, в окончательной экспериментальной зависимости мощности от расхода пара, помимо основной по-

Таблица 3

№ п/п	Положение клапанов св. жого пара Р-жим	Соответственно конденсационному режиму с включенным регулятором давления при мощности				Полное открытие дросселя и первого обводного клапана	Полное открытие дросселя и второго обводного клапана		
		$0,6 N_{\partial}$	$0,7 N_{\partial}$	$N_{\partial}^{эк}$	$\frac{N_{\partial}^{эк} + N_{\partial}^{н}}{2}$		$\frac{1}{2}$ открытия второго обводного клапана	$\frac{3}{2}$ открытия второго обводного клапана	полное открытие второго обводного клапана
1	Режим с регулируемым отбором	1 опыт	1 опыт	2 опыта	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	2 опыта

Таблица 4

№ п/п	Давление в конденсаторе, атм Режим	Минимальное	0,040	0,045	0,050	0,060	0,070	0,080	0,110	0,130
1	Максимальный расход пара в ч. н. д.	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт
2	Расход пара в ч. н. д. 40—50% от максимального	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт	1 опыт

Примечание. При испытаниях турбины с сопловым парораспределением программа опытов составляется также в соответствии с общими указаниями, данными в пп 2 и 3. При этом программа обязательно должна включать опыты при полном открытии каждого из групповых клапанов.

грешности, определяемой в большей своей части конечной точностью измерения мощности и расхода пара, содержится погрешность двух родов:

1) вошедшая в результаты испытания за счет колебания параметров процесса при проведении опытов;

2) внесенная в результаты испытания за счет ошибки, возникшей при приведении к номинальным параметрам.

Уменьшение основной погрешности должно идти по линии применения более точных электроизмерительных приборов и методики измерения и подсчета расхода пара.

Погрешность, перечисленная в пп. 1 и 2 (по своей величине, как правило, значительно меньшая), существенно зависит от принятого метода поддержания постоянства режима машины при испытании и способа пересчета результатов на номинальные параметры.

Поэтому, рассматривая и давая сравнительную оценку различным методам поддержания постоянства режима машины при испытании, следует подходить к этому с точки зрения сведения к возможному минимуму величин этих последних погрешностей.

Известны следующие методы ведения испытания:

1) при постоянной мощности;

2) при постоянном расходе пара;

3) при неподвижном парораспределении.

Неподвижность парораспределения достигается упором органов парораспределения в сторону открытия, что предотвращает возможность наброса нагрузки и в то же время не препятствует нормальному закрытию клапанов в случае внезапного сброса нагрузки. Для того чтобы из-за возможного некоторого повышения частоты сети во время опыта клапаны не могли прикрыться под воздействием регулятора скорости — после установки упора несколькими оборотами синхронизатора, устанавливают систему регулирования на повышенное число оборотов.

Рассмотрим процессы, происходящие в машине при изменении параметров пара, для различных методов поддержания постоянства режима в ходе опыта.

а) Изменение начального давления

1. $N_0 = \text{пост.}$ Расход пара и давление в промежуточных ступенях изменяются незначительно.

Вследствие иного состояния пара перед соплами и нового расхода пара клапаны занимают новое положение. К. п. д. турбины изменяется главным образом за счет изменившихся потерь в клапанах и к. п. д. регулирующей ступени.

2. $D_0 = \text{пост.}$ Клапаны занимают новое положение только вследствие изменения состояния пара перед соплами I ступени.

При заданном отклонении начального давления перемещение клапанов при методе $D_0 = \text{пост.}$ несколько меньше, чем при методе $N_0 = \text{пост.}$ К. п. д. турбины изменяется главным образом за счет изменения потерь в клапанах и к. п. д. регулирующей ступени.

$h_{кл} = \text{пост.}$ Расход пара и давление в промежуточных ступенях изменяется пропорционально начальному давлению. Все точки процесса расширения, за исключением состояния за последней ступенью, двигаются приблизительно по линии $pv = \text{пост.}$ Таким образом, располагаемые и использованные тепловые перепады всех ступеней, кроме последней, остаются почти неизменными (для области влажного пара это также практически верно) и внутренний к. п. д. турбины тоже заметно не меняется.

Зависимость внутреннего к. п. д. машины от положения парораспределения (например, подъема сервомотора) есть кривая такого же вида, как и зависимость от расхода пара.

Поэтому понятно, что в результате опыта, проведенного при изменяющемся положении клапанов, может быть получено значение к. п. д. (или мощности), лишь приближающееся к истинному.

б) Изменение начальной температуры

Для этого случая метод «при неподвижном парораспределении» не обеспечивает неизменности внутреннего к. п. д. Однако он предпочтительнее остальных методов в силу того, что позволяет в ходе опыта сохранить неизменной относительную величину перепада, теряемого в регулирующих клапанах. Внутренний к. п. д. машины изменяется вследствие того, что при изменении начальной температуры изменяется общий тепловой перепад и величина отношения U/C_1 для каждой ступени.

Благодаря незначительному изменению этой величины (порядка до 1,5%, при допустимом отклонении температуры), а также тому, что ступени выполняются при U/C_1 , соответствующем максимуму к. п. д. (или вблизи этого максимума), для турбины в целом он хотя и изменится, но это изменение будет пренебрежимо мало.

Сколько-нибудь значительное изменение давления отработавшего пара в ходе опыта обычно не происходит и этот вопрос вряд ли стоит рассматривать.

Что касается погрешности, вносимой в процессе пересчета результатов опытов на номинальные параметры, то здесь метод пересчета «при неподвижном парораспределении» является также наиболее целесообразным.

В самом деле, если при проведении опытов поддерживалась постоянная мощность, то приведение логично выполнить посредством пересчета расхода пара, полученного для условий опыта.

При таком пересчете подразумевается, что клапаны должны занять новое положение, отвечающее приведенному расходу пара при номинальном его состоянии. Естественно в этом случае применить для пересчета поправочные кривые, полученные при изменении заданного параметра и неизменной мощности машины.

При пересчете результатов опытов, проведенных «при постоянном расходе пара», к номинальным параметрам приводится мощность, а расход пара остается неизменным. Но при том же

расходе и номинальных параметрах клапаны должны занять новое положение, а следовательно, и величина поправки должна быть определена по кривой, отражающей влияние меняющегося параметра на мощность при постоянном расходе пара. Практически получение такого рода поправочных кривых нереально и для определения поправок используются кривые, отражающие изменение лишь располагаемого теплоперепада (т. е. в предположении неизменности к. п. д. машины при изменении параметров).

В действительности это не так и вместе с поправкой в результаты вносится погрешность из-за неучтенного изменения к. п. д. машины.

Понятно, что и при пересчете результатов опытов на номинальные параметры, метод «при неизменном открытии клапанов» (или неподвижном парораспределении, что одно и то же) позволяет в максимальной степени соблюсти условия подобия для всей турбины в целом и отдельных элементов ее в частности.

Поскольку это обеспечивает минимальную разницу, к. п. д. «опытного» и «приведенного» процессов расширения в турбине—указанный метод должен быть признан наилучшим как при проведении испытания, так и при пересчете опытов на номинальные параметры.

Особенно важно использование этого метода (проведение испытания при неподвижном парораспределении) в опытах для определения поправочной кривой на вакуум, когда требуется максимальная точность.

Проведение этого испытания при постоянном давлении в «контрольной» ступени, как это рекомендовано существующими Руководящими указаниями ОРГРЭС (см. «Методика определения режима наивыгоднейшего вакуума в паротурбинных установках», ГЭИ, 1944) дает менее надежные результаты.

Испытание при переменном расходе желательно проводить также при неподвижном парораспределении; менее желательно, но допустимо постоянство положения клапанов поддерживать с помощью синхронизатора.

Неудобство метода испытания при неподвижном парораспределении заключается в том, что одновременно с колебанием начальных параметров (особенно начального давления) будет колебаться мощность генератора, а если испытывается машина с регулируемым отбором (клапаны ч. н. д. также закреплены), то будет также изменяться давление в отборе и расход пара в отбор. Поэтому, если предварительное наблюдение за постоянством начального давления подлежащей испытанию турбины заставляет ожидать значительных колебаний его при проведении опытов, можно пойти на проведение при неподвижном парораспределении части высокого и низкого давления только конденсационных опытов. Опыты же с отбором проводить при неподвижном парораспределении только в ч. в. д.

Тогда характеристика конденсационного режима будет построена по данным опытов без отбора, произведенных при непо-

движном парораспределении части высокого и низкого давления. Все особенности парораспределения машины будут, следовательно, в ней отражены. На характеристике ч. в. д., которая будет построена по данным опытов с отбором, также будут отражены все особенности парораспределения высокого давления.

В случаях, когда неподвижность парораспределения по каким-либо причинам вообще не может быть обеспечена, испытание при переменном вакууме должно проводиться по методу постоянного давления в контрольной ступени, а остальные опыты — при постоянной мощности. Проведение испытания при постоянном расходе пара вряд ли целесообразно, так как существенных преимуществ это не дает, но технически более сложно. При проведении любого испытания, а особенно при неподвижном парораспределении, должно быть обеспечено максимальное постоянство начальных параметров.

В качестве ориентировки в отношении величин предельно допустимого отклонения параметров от номинальных значений и от среднего за опыт могут служить табл. 5 и 5а, взятые из «Проекта норм испытания паровых турбин» (А. В. Щегляев и Н. Г. Морозов, ОНТИ, 1937).

Таблица 5

Допустимые отклонения средних за опыт величин от номинальных

Наименование параметра	Конденсационные турбины	Турбины с противодавлением	Турбины с промежуточным отбором
Абсолютное давление свежего пара при сопловом регулировании . . .	$\pm 5\%^*$	$\pm 5\%^*$	$\pm 5\%^*$
Температура свежего пара	$\pm 25^\circ \text{C}$	$\pm 25^\circ \text{C}$	$\pm 25^\circ \text{C}$
Противодавление или давление в регулируемом отборе	—	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Адиабатическое теплопадение	—	$\pm 7\%$	$\pm 7\%$
Расход свежего пара	$\pm 7\%$	$\pm 7\%$	$\pm 7\%$
Расход регулируемого отбора пара	—	—	$\pm 7\%$
Температура промежуточного перегретого пара	$\pm 20^\circ \text{C}$	$\pm 20^\circ \text{C}$	$\pm 20^\circ \text{C}$
Количество обогреваемого конденсата в системе регенерации	$\pm 7\%$	—	$\pm 7\%$
Температура питательной воды при выходе из системы регенерации	$\pm 10^\circ \text{C}$	—	$\pm 10^\circ \text{C}$
Температура охлаждающей воды	Без ограничений	—	Без ограничений
Расход охлаждающей воды	$\pm 10\%$	—	$\pm 10\%$
Абсолютное давление в конденсаторе	Без ограничений	—	Без ограничений
Число оборотов	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$

* Предлагаемая ниже методика обработки результатов испытаний допускает большее отклонение давления свежего пара в условиях опыта от номинального. В самом деле, отклонение начального давления вызывает изменение средней влажности, а следовательно, внутрипотока к. п. д. ступеней, работающих в области влажного пара. Если специально не учитывать этого изменения к. п. д., опыты, проведенные при различном начальном давлении, будучи пересчитаны на одинаковые начальные параметры, окажутся все же несопоставимыми.

Таблица 5а

Допустимые отклонения величин от среднего за опыт значения

Наименование параметра	Конденсационные турбины	Турбины с противодавлением	Турбины с промежуточным отбором
Абсолютное давление пара при сопловом регулировании	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Температура свежего пара	$\pm 10^\circ \text{C}$	$\pm 10^\circ \text{C}$	$\pm 10^\circ \text{C}$
Противодавление или давление в регулируемом отборе	—	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Расход свежего пара	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Мощность	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Расход регулируемого отбора пара	—	—	$\pm 7\%$
Количество обогреваемого конденсата	$\pm 5\%$	—	$\pm 5\%$
Абсолютное давление в конденсаторе	$\pm 10\%$	—	$\pm 10\%$
Температура охлаждающей воды	$\pm 5^\circ \text{C}$	—	$\pm 5^\circ \text{C}$

IV. СХЕМА РАБОТЫ ТУРБОАГРЕГАТА ПРИ ИСПЫТАНИИ

I. Тепловая схема

В тех случаях, когда эксплуатационная тепловая схема достаточно проста, она остается при испытании без изменений. Иногда схема бывает осложнена различными промежуточными подводами и отводами, например подводами в регенеративные подогреватели отработавшего пара турбопривода насосов конденсационной группы, отсосов из концевых уплотнений турбины питательного насоса высокого давления и т. п.; иногда пар нерегулируемых отборов используется для отопительных целей, для душевых бойлеров и т. п.

В таком случае при испытании подобные потоки следует из схемы исключить, по возможности оставив тепловую схему в ее принципиальном виде. Влияние этих потоков на общий баланс, как правило, невелико и без ущерба для точности испытания может быть учтено с помощью соответствующим образом составленных поправочных кривых.

Также целесообразно перевести питание имеющегося в большинстве схем деаэратора на посторонний источник. Выделение

Вопрос о возможном отклонении начального давления есть, таким образом, вопрос о допустимой разнице относительной погрешности отдельных опытов.

Подсчет показывает, что для конденсационных турбин с регенерацией, работающих паром средних и низких параметров, эта погрешность (т. е. изменение внутреннего к. п. д. турбины) составляет 0,2% на 10% отклонения начального давления от номинального. Соответствующая цифра для параметров $p_0 = 90 \text{ атм}$ и $t_0 = 480^\circ \text{C}$ — 0,15% от внутреннего к. п. д. при номинальных параметрах на каждые 10% изменения начального давления.

Если приведенные выше цифры использовать для введения поправки к мощности (если давление в условиях опыта понижено, поправка к мощности со знаком минус и наоборот) то испытание можно проводить при практически неограниченном отклонении начального давления (до 50 %) от номинального.

Если эту поправку не вносить, можно считать допустимым отклонение давления в пределах 15%.

Понятно, что в случае испытания турбины, тепловой процесс в которой протекает целиком в области перегретого пара, отклонение начального давления может быть неограниченным.

на время испытания одного или двух деаэраторов из общей схемы станции меняет обычную схему станции и снижает надежность ее работы, а часто оказывается просто невозможным. Однако для того, чтобы в ходе обработки результатов испытания могло быть учтено влияние исключенного при испытании, но имеющего место в эксплуатации, подвода или отвода, необходимо знать параметры, характеризующие этот поток. Это обстоятельство следует иметь в виду при составлении списка подготовительных работ для организации пунктов соответствующих измерений.

Если не представляется возможным произвести эти измерения в ходе испытания, они должны быть произведены перед началом испытания или же в промежутке между опытами.

2. Схема определения основных параметров работы установки

При рассмотрении тепловой схемы намеченной для испытания установки, следует ясно представить себе, какие измерения (параметров и расхода) необходимо произвести для решения задач, поставленных перед испытанием.

Эти измерения должны давать, в первую очередь, картину расходного баланса установки, процесса расширения пара в турбине, работы системы парораспределения и вспомогательного оборудования.

Ниже приводится рациональная схема определения составляющих расходного баланса и прочих показателей работы установки применительно к турбине с регулируемым отбором:

а) Расходный баланс установки

Расход свежего пара	по измерению дроссельным прибором на паропроводе (паропроводах)
Расход пара в регулируемый отбор	по измерению дроссельным прибором (если отбор теплофикационный, по измерению расхода дренажа бойлеров)
Расход пара на регенеративные подогреватели	из теплового баланса подогревателей при известном расходе конденсата или питательной воды, нагреве в подогревателях и параметрах пара отборов
Расход отработавшего пара	по измерению дроссельным прибором расхода конденсата отработавшего пара за конденсатными насосами

б) Процесс расширения пара в турбине

по измерению параметров свежего пара и в линиях отборов у турбины, по общему балансу турбогенератора

в) Работа системы парораспределения

по измерению давления за парораспределительными клапанами совместно с данными расходного баланса

г) Работа вспомогательного оборудования

температурный напор и гидравлическое сопротивление конденсатора и подогревателей (по измерению давления пара и температуры охлаждающей воды, конденсата, питательной воды в конденсаторе и подогревателях)

По этой схеме расходный баланс может быть проконтролирован, так как любая входящая в него величина измеряется (или определяется из теплового баланса) и может быть найдена из других величин.

При испытании конденсационной машины схема определения основных параметров работы остается неизменной. Упрощается лишь расходный баланс вследствие отсутствия расхода в регулируемый отбор.

Может существовать и другой вариант схемы расходного баланса, когда расход пара регулируемого отбора не измеряется. Такая схема может быть вполне равноценной и даже предпочтительнее первой при теплофикационном регулируемом отборе из-за сложности установки измерительной шайбы в паропроводе большего диаметра и усложнения испытания при измерении расхода дренажа бойлеров, так как при этом требуется обеспечить гидравлическую плотность их и неизменность уровня дренажа в паровом пространстве. В этом случае расход пара регулируемого отбора определяется исходя из измеренных расходов свежего пара и конденсата — отработавшего пара, а диафрагма свежего пара перед испытанием тарируется.

3. Особенности тепловой схемы при проведении опытов при переменном вакууме

Опыты при переменном давлении отработавшего пара проводятся при отключенном регулируемом отборе (регулятор давления также отключен). Нерегулируемые отборы на подогреватели высокого давления и на деаэратор отключены. Отборы пара на подогреватели, расположенные до деаэратора (по ходу конденсата) остаются включенными. Отключение отборов производится закрытием вентилей на паропроводах отборов и пропуском воды по обводным линиям подогревателей. Расход пара на машины в этих опытах желательно измерять, хотя эта величина и не является обязательной при обработке результатов отдельной серии опытов.

В случае, если расход пара не измеряется, он может быть впоследствии определен соответственно измеренному давлению в контрольной ступени. Для этого должна быть использована зависимость давления в этой ступени от расхода пара (в последующие ступени), которая будет получена в результате обработки данных испытания при переменном расходе.

Давление в контрольной ступени при проведении опытов с переменным вакуумом является очень важным параметром и измерению его следует уделить серьезное внимание.

В качестве контрольной используется обычно ступень после какой-либо камеры отбора, где пар перегрет.

Ступень, следующая за отбором на первый (по ходу конденсата) регенеративный подогреватель, не может быть контрольной.

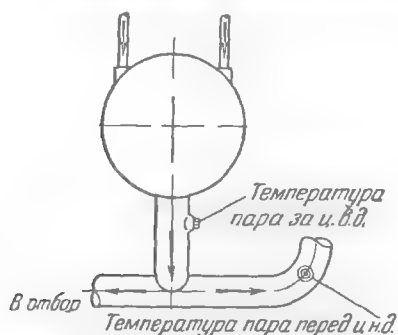
Желательно выбрать такую контрольную ступень, давление перед которой может измеряться с помощью ртутного U-образного манометра, что обеспечит максимальную точность.

4. Измерение температуры отработавшего пара ч. в. д.

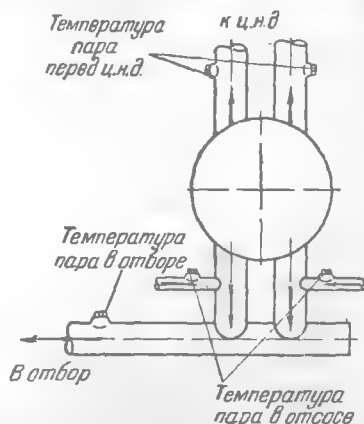
Вопрос организации измерения температуры отработавшего пара ч. в. д. выделяется особо, так как ее измерение представляет известные трудности. В то же время эта температура имеет весьма важное значение для определения характеристики ч. в. д.

В большом числе конструкций машин отсос пара из промежуточной камеры переднего уплотнения производится или в камеру регулируемого отбора (фиг. 12) или в отводящий патрубок регулируемого отбора (фиг. 13).

Как будет показано далее, для определения характеристики



Фиг. 12. Измерение температуры пара за ч. в. д. (первый случай).



Фиг. 13. Измерение температуры пара за ч. в. д. и в линии регулируемого отбора (второй случай).

ч. в. д. надо получить на основании измерений температуры и давления пара либо теплосодержание смеси пара, выходящего из ч. в. д. и отсасываемого из переднего уплотнения, либо теплосодержание пара, выходящего из ч. в. д. в «чистом виде».

При схеме подвода пара из уплотнения, как показано на фиг. 12, в гильзах на отводящем патрубке из ч. в. д. и на перепускной трубе и ч. н. д. измеряется непосредственно температура смеси пара из ч. в. д. и отсасываемого из уплотнения (установка двух гильз обеспечивает большую надежность измерения).

Подсчет внутренней мощности ч. в. д. в этом случае производится по теплосодержанию смеси, найденному на основе температуры, измеренной в гильзах.

При схеме по фиг. 13 температура пара в отборе не является температурой смеси отсоса из уплотнения и всего потока пара из ч. в. д., а характеризует собой смесь только отбираемого пара и отсоса из уплотнения.

В данном случае расчет внутренней мощности целесообразно производить по теплосодержанию пара, выходящего из ч. в. д.

(без учета влияния протечки). Это теплосодержание может быть найдено из уравнения смещения.

Однако определение теплосодержания пара после ч. в. д. по уравнению смещения будет весьма ненадежным, если нет гарантии, что весь пар, отведенный из переднего уплотнения, пошел в линию отбора.

Опыт показывает, что несмотря на наличие даже значительного потока пара из камеры отбора турбины в линию отбора, часть пара из уплотнения проникает в камеру (навстречу потоку отборного пара).

Отсутствие попадания пара из отсоса в камеру регулируемого отбора можно установить по совпадению температур, измеренных в двух (или более) точках.

Такая проверка справедлива при дроссельном парораспределении, при сопловом же она применима лишь при полностью открытых групповых клапанах.

По данным испытания турбины типа АТ-25 ЛМЗ можно констатировать, что подобное совпадение температуры наступало, когда расход в отбор составлял $\geq 50\%$ от расхода свежего пара.

Теплосодержание пара после ч. в. д. применительно к фиг. 13 определяется по формуле:

$$i_{ч.в.д.} = i_n - (i_{отс} - i_n) \frac{D_{отс}}{D_n - D_{отс}};$$

здесь D_n , $D_{отс}$ — расход пара в отбор и расход пара из отсоса;
 i_n , $i_{отс}$ — теплосодержание отбираемого пара и теплосодержание отсоса.

Таким образом, для схемы по фиг. 13 должны быть обеспечены измерения температуры в гильзах на паропроводе отбора, паропроводах пара из уплотнений и перепускных трубах в ч. н. д. Равенство температур на обеих перепускных трубах свидетельствует о том, что весь пар из уплотнений пошел в отбор. Кроме того, температура, измеренная в перепускных трубах, может служить контролем для температуры, определенной из уравнения смещения.

Расход пара из отсоса определяется или путем непосредственного измерения с помощью измерительной диафрагмы или расчетом. Наиболее правильным решением следует считать переключение трубопроводов отсоса либо на подходящий регенеративный подогреватель (возможно в схемах, где регулируемый отбор используется для регенеративного подогрева конденсата или питательной воды) или на конденсатор.

При этом необходимо соблюдать следующее условие.

На линии отсоса перед аппаратом, к которому она подключена (подогреватель, конденсатор), должна быть задвижка или вентиль и перед этим запорным органом — манометр. При изменении режима машины должно быть установлено такое положение задвижки (вентиля), чтобы давление в линии отсоса по ма-

нометру равнялось давлению в камере регулируемого отбора в данный момент.

При выполнении такой схемы на трубопроводе отсоса следует установить измерительную диафрагму — для определения расхода отсасываемого пара и термометрическую гильзу — для измерения температуры отсасываемого пара.

Теплосодержание пара после ч. в. д. в этом случае определяется на основании непосредственного измерения температуры пара в линии регулируемого отбора.

Необходимо подчеркнуть, что вопрос определения температуры пара за ч. в. д. чрезвычайно важен и решать его можно только после тщательного изучения схемы отвода лабиринтового пара намеченной к испытанию машины. От того, насколько удачно будет решен этот вопрос, зависит точность результатов испытания.

У. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ К ИСПЫТАНИЮ

1. Общие указания

После изучения установки составляется список подготовительных работ в трех экземплярах, два из которых передаются руководству станции и один остается у организации, ведущей работу. Помимо перечня работ, к списку должна быть приложена рабочая тепловая схема турбогенератора при испытании, с указанием пунктов измерений, перечень этих пунктов и техническая программа испытания с подробным перечислением требуемых режимов. Весь материал должен быть согласован с руководством станции и цеха, снабжен необходимыми чертежами, эскизами и быть исчерпывающе точным.

Ниже приводятся отдельные сведения, которые могут быть полезны при составлении списка подготовительных к испытанию работ.

2. Расходный баланс установки

а) Расход пара

Для измерения расхода пара (свежего и отводимого) при испытании применяются нормальные дроссельные диафрагмы или сопла. Применение ненормированных приборов (труба или вставка Вентури, диафрагмы с ненормальным отбором давления до и после прибора, сегментные диафрагмы и т. п.) без тарировки их на месте установки нежелательно вследствие неопределенности величины коэффициента расхода.

Допустимо использование эксплуатационных дроссельных приборов (нормированных) в случаях, когда их характеристика обеспечивает достаточную точность измерения при режиме, соответствующем минимальному расходу пара по программе испытания. Минимальным перепадом следует считать 70 мм (Hg—H₂O) при пользовании ртутным дифференциальным манометром.

Перед испытанием необходимо провести ревизию дроссельного прибора в присутствии руководителя испытания. Практика показывает, что иногда эксплуатационные данные о приборе не соответствуют действительности (диаметр кольцевых камер значительно отличается от диаметра паропровода, фактический диаметр расточки диска не соответствует паспорту, диск сильно корродирован, хотя считается в хорошем состоянии, и т. п.).

Должно быть обращено внимание на соответствие требованиям норм: участка, где установлен дроссельный прибор, отводов к уравнительным сосудам, положения уравнительных сосудов по отношению к диафрагме и прокладки импульсных линий к дифференциальному манометру. Даже на давно эксплуатируемых установках встречается целый ряд отступлений от норм. Следует убедиться в том, что прибором измеряется весь расход. Например, при установке диафрагмы на паропроводе свежего пара после сепаратора между дроссельным прибором и турбиной обычно имеется дренаж в нижнюю часть сепаратора. На дренажной трубке должен быть вентиль, который следует закрывать во время испытания. При установке диафрагмы до сепаратора причиной ошибки может быть неисправный водоотводчик сепаратора. Весь паропровод от диафрагмы до сопловой коробки турбины должен быть тщательно обследован, и мероприятия, обеспечивающие отсутствие неучтенных утечек пара, занесены в список подготовительных к испытанию работ.

Гильза для измерения температуры пара должна устанавливаться перед диафрагмой не ближе $1\frac{1}{2}$ —2 м. Давление пара, служащее для определения его удельного веса при подсчете расхода по диафрагме, должно определяться только на основании показаний манометра, подключенного на плюсовой стороне дифференциального манометра.

При несоответствии характеристики существующего дроссельного прибора требующейся или отсутствии прибора следует устанавливать нормальную острую диафрагму с кольцевыми камерами.

Если диафрагма будет использована лишь в период испытания в течение 1— $1\frac{1}{2}$ мес. и затем удалена, материалом для нее может служить обыкновенная углеродистая сталь.

Если же предполагается использование диафрагмы в дальнейшем в качестве эксплуатационной, материал следует выбирать в соответствии с приводимой таблицей, составленной по данным треста «Теплоконтроль».

Таблица 6

Температура измеряемой среды, °С	100—400	401—450	451—520
Наименование изделий	Марки сталей		
Гильзы для измерения температуры и бобышки	10; 15; 20; 25	15М; 27М	20М; 15ХМ; ЭИ-257
Измерительные диафрагмы и сопла .	15М; 20М	15М; 20М	20М; 15ХМ; ЭИ-257

Детали должны быть испытаны на плотность и прочность.

Величины пробного давления устанавливаются в соответствии с ГОСТ 356-43.

Испытательное (пробное) давление $p_{пр} = K p_{ра}$. Значение K дано в табл. 7.

Таблица 7

$t, ^\circ\text{C}$	0—120	121—300	301—400	401—425	475—500	501—520
K	1,5	1,9	2,4	2 8	5,3	6,3

ГОСТ 355-41

ГОСТ 356-43

В большинстве случаев измерительная диафрагма для установок высокого давления изготавливается из материала трубопровода.

Хотя измерение с помощью нормальной диафрагмы вследствие большей точности всегда предпочтительнее, однако в некоторых случаях применение сопла оказывается неизбежным, так как при измерении нормальной диафрагмой даже при максимально допустимом d/D могут получаться чрезмерно большие перепады давления. Это требует применения специальных приборов для его измерения.

Такое положение более вероятно на установках высокого давления.

Для измерения перепада давления применяется, как правило, двухстекольный дифференциальный манометр, рассчитанный на измерение перепада давления до 600—700 мм (Hg—H₂O). При испытании установок высокого давления используются дифференциальные манометры специальной конструкции.

б) Расход воды

Основное измерение по воде — измерение расхода конденсата отработавшего пара турбины и питательной воды, направляемой в котельную.

Измерение расхода конденсата бойлеров необходимо при испытании теплофикационных машин для определения расхода пара регулируемого отбора. Возможны и иные случаи измерения расхода воды.

Измерение расхода конденсата отработавшего пара организуется на напорной стороне конденсатного насоса, с учетом требований «Правил № 169»*.

Унос пара вместе с неконденсирующимися газами, отсасываемыми эжектором из конденсатора, не может внести в измерение расхода конденсата искажений в случае, если дренаж холодильников эжектора отводится в конденсатор. Бывают схемы, в кото-

* „Правила № 169 по измерению расхода жидкостей, газов и пара при помощи сопел и диафрагм“, Каталогиздат НКМ, 1938.

рых дренаж холодильников отводится в баки, не связанные со схемой турбины. В этом случае следует измерить расход дренажа эжектора с помощью протарированного бачка.

Сопоставление этого расхода с расходом пара через сопла эжектора позволит оценить величину уноса.

В установках с водоструйным эжектором унос пара всегда теряется, смешиваясь с рабочей водой эжектора. Для контроля величины уноса следует при испытании поставить тщательное измерение температуры рабочей воды до и после эжектора.

Измерение давления рабочей воды перед соплами позволит подсчитать ее расход и из теплового баланса эжектора найти унос пара из конденсатора.

Величина уноса пара тем больше, чем выше температура входящей охлаждающей воды, меньше расход ее и выше паровая нагрузка конденсатора.

Необходимо иметь в виду, что дроссельный прибор желательно расположить после отвода конденсата для рециркуляции, гидравлического уплотнения атмосферного клапана, концевое уплотнения турбины и прочих отводов, возвращаемых в конденсатор. В противном случае эти потоки, которые могут достигать значительных величин, составляют кольцевой поток через диафрагму и искажают измерение расхода.

Дроссельный прибор может быть расположен как до регенеративных подогревателей, так и после последнего подогревателя низкого давления. Если в конденсатную линию вводятся дренажи греющего пара подогревателей высокого давления и, следовательно, расход конденсата за местом ввода этих дренажей равен расходу свежего пара на машину (при наличии регулируемого отбора — расходу свежего пара минус регулируемый отбор), целесообразно организовать измерение расхода конденсата в двух местах: перед первым, по ходу конденсата, подогревателем низкого давления и перед деаэратором после слияния основного конденсата с дренажами подогревателей высокого давления. При организации последнего измерения следует учесть, что расстояние от места ввода дренажей в конденсатную линию до дроссельного прибора желательно иметь возможно большим из соображений выравнивания потока.

Расстояние от гильзы для термометра, измеряющего температуры смеси конденсата и дренажей, до места ввода дренажей должно быть также возможно большим для достижения полного смешения потоков и выравнивания температуры; эта температура, определяющая удельный вес воды перед диафрагмой, весьма важна еще потому, что является исходной для теплового баланса деаэратора, составляемого в процессе обработки результатов испытания.

Когда испытание проводится при отключенном отборе на деаэратор и питании его посторонним паром, на основе этого баланса вычисляется поправка к измеренной в условиях опытов мощности.

Кроме того, определяемый на основе этой температуры подогрев конденсата за счет тепла, подводимого с дренажами, позволяет контролировать правильность составления теплового баланса регенеративных подогревателей и заметить ненормальности работы схемы (например, перетекание дренажей через неплотные задвижки, переливные водоотводчики и т. п.).

Наличие двойного измерения расхода конденсата, наряду с измерением расхода свежего пара, позволяет:

1) Создав условия равенства расходов через все мерные дроссельные приборы, сопоставить измеренные расходы, контролируя тем самым правильность работы приборов, и протарировать дроссельный прибор на паропроводе свежего пара.

2) По разности измеренных расходов конденсата в условиях нормальной схемы оценить точность определения расходов отбираемого пара, судить о плотности трубных пучков подогревателей высокого давления и т. п.

При выборе места установки нормальной диафрагмы на трубопроводе питательной воды следует иметь в виду, что между диафрагмой и подогревателем не должно быть отводов. Наличие отводов вызывает необходимость установки заглушек, поскольку нет гарантии в плотности запорной арматуры на отводах. Установка заглушек на отводах нежелательна, так как это обычно связано с серьезными нарушениями нормального режима работы станции.

При бесфланцевом трубопроводе (установка высокого давления) применяются вварные диски, что требует особой тщательности выполнения сверлений для отвода импульсных трубок.

Измерение расхода дренажа организуется после перекачивающего этот дренаж насоса. В трубопроводе, где дренаж при температуре насыщения течет под своим давлением, устанавливать дроссельный прибор не следует; падение давления в дроссельном приборе вызовет парообразование и измерение будет искажено.

в) Расход пара на регенерацию

Расход греющего пара на регенеративные подогреватели определяется из уравнения теплового баланса. Для возможности решения этого уравнения должен быть известен ряд величин. Эти величины — расход обогреваемого конденсата или питательной воды через подогреватель, повышение теплосодержания обогреваемой воды, а также параметры греющего пара и его дренажа из подогревателя, определяющие теплоиспользование пара нерегулируемого отбора, — должны быть измерены в условиях опыта. Если в подогреватель вносится тепло с дренажем подогревателя, конденсирующего пар более высокого давления, необходимо знать также расход этого дренажа и его теплоиспользование (разность теплосодержания при входе и при выходе из подогревателя).

3. Параметры пара и воды

В условиях испытания обычно измеряются давление и температура. В отношении перегретого пара эти два параметра вполне точно характеризуют его состояние.

Для влажного пара этих параметров недостаточно, однако в отдельных случаях температуру влажного пара следует измерять, так как она может служить контролем правильности измерения давления, а в отдельных случаях позволяет достаточно хорошо судить о некоторых особенностях режима работы установки. Например, в линию нерегулируемого отбора на подогреватель низкого давления подведен пар из промежуточных камер концевых уплотнений вала машины. При значительном регулируемом отборе и малой паровой нагрузке ч. н. д. температура в линии отбора у турбин оказывается близкой к температуре насыщения, соответствующей давлению в данной точке, а у подогревателя пар по измерению оказывается перегретым. Такое положение будет означать, что при этом режиме отбор на подогреватели практически отсутствует и в подогревателе конденсируется лишь пар из уплотнений.

Состояние воды достаточно точно определяется температурой ее до значения не выше 100°C . При более высоких температурах должно приниматься также во внимание и давление воды. Измерение давления тем важнее, чем выше температура и давление воды. Так, при температуре воды 100°C и давлении 140 ата теплосодержание ее равно 102,5 ккал/кг, при том же давлении и температуре 230°C теплосодержание будет 237,0 ккал/кг.

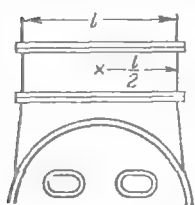
Кривая расширения пара в турбине (в *is*-диаграмме) наносится обычно по точкам, полученным при измерении параметров пара, отводимого из промежуточных ступеней турбины. За начальную точку процесса принимается давление и температура, измеренные перед стопорным клапаном машины (после ближайшей от турбины линейной задвижки). Точка присоединения манометра и гильза для установки термометра должны отстоять от стопорного клапана на 1—3 м. Гильза должна устанавливаться в паропроводе; использование гильз в корпусе стопорного клапана, приливе фланца и т. д. не допускается ввиду возможных искажений.

Если подвод пара к турбине выполнен несколькими паропроводами, необходимо организовать измерение давления и температуры на каждом из них и в качестве расчетной начальной точки процесса принять средневзвешенное давление и температуру (при подводе четырьмя паропроводами от двух сепараторов измерение должно быть поставлено на одном из двух паропроводов от каждого сепаратора).

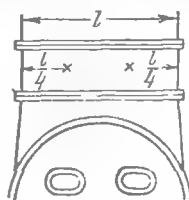
Давление отбираемого пара, измеренное в камере отбора или на отводящем паропроводе на расстоянии 1—2 м от турбины (обязательно до обратного клапана), характеризует работу лопаточного аппарата. Давление же у подогревателя вследствие

сопротивления паропровода отбора (обратного клапана, запорной арматуры и собственно линии) будет соответственно ниже. Поэтому для характеристики работы подогревателя (определения коэффициента теплопередачи) следует организовать измерение давления на входном патрубке подогревателя или же дифференциальное измерение общего сопротивления паропровода отбора между турбиной и подогревателем. Последнее надежнее, но сложнее, и при проведении обычных эксплуатационных испытаний не применяется.

Измерение температуры отбираемого пара следует производить на отводящем паропроводе на расстоянии 1—3 м от фланца турбины. При условии потребления пара теплообменным аппаратом, длине паропровода от гильзы до этого аппарата не более



Фиг. 14. Точки присоединения приборов для измерения давления отработавшего пара (вакуума) — 2 точки.



Фиг. 15. Точки присоединения приборов для измерения давления отработавшего пара (вакуума) — 4 точки.

10 м и надлежащей изоляции паропровода измерение температуры пара у аппарата имеет смысл лишь как контрольное и может не производиться. Теплообменное содержание у турбины и теплообменного аппарата в этих условиях остается практически неизменным. Измерение температуры у аппарата необходимо лишь в случае, когда в линию отбора подводится какой-либо посторонний пар (от перехвата лабиринтового уплотнения, шток-ов клапанов и т. п.).

Конечным давлением считается величина, определенная по показаниям прибора (вакуумметра или укороченной барометрической трубки), подключенного к верхней части конденсатора (над трубками) или в горловине конденсатора. Если машина не имеет двухъярусной лопатки, для измерения достаточно двух приборов на конденсатор, подключенных симметрично со стороны водяных камер (фиг. 14).

Для турбин мощностью до 10 000 квт можно ограничиться одним прибором, подключенным над трубками конденсатора.

Наличие двухъярусной лопатки в предпоследней ступени обуславливает менее однородный поток отводимого к конденсатору пара. В связи с этим целесообразно устанавливать четыре прибора на конденсатор (по два с каждой стороны, фиг. 15)

Расчетным конечным давлением считается среднее арифметическое из подсчитанного по показаниям всех приборов.

При испытании необходимо вести измерение вакуума также и по эксплуатационному прибору с тем, чтобы в результате анализа материалов испытания убедиться в совпадении давлений в конденсаторе до измерения постоянным эксплуатационным прибором и приборами, установленными для испытания.

В случае заметной разницы давления по этим измерениям постоянный эксплуатационный прибор должен быть подключен к одной из точек, использовавшихся при испытании.

Если теплосодержание пара отборов, лежащих в области перегретого пара, берется для теплового баланса регенеративных подогревателей по непосредственному измерению параметров у турбины, то теплосодержание отборов в области влажного пара и отработавшего пара определяется либо по предположительному процессу, построенному на основании теплового баланса турбогенератора, либо для теплового баланса подогревателя низкого давления и конденсатора принимается просто теплоиспользование влажного пара 535–540 ккал/кг.

4. Работа системы парораспределения

В рамках эксплуатационного теплового испытания работа системы парораспределения характеризуется только диаграммой изменения давления пара за клапанами в зависимости от расхода свежего пара. Для машины с регулируемым отбором аналогичная диаграмма строится также для ч. н. д.

Полученные, таким образом, диаграммы парораспределения позволяют, с одной стороны, оценить правильность построения связи расхода пара и мощности и соответствующим образом ее скорректировать, а с другой стороны, судить о настройке парораспределения с точки зрения экономичности и устойчивости турбины при параллельной работе.

В большинстве случаев сверления корпуса для измерения давления за клапанами выполняются при изготовлении машины. Если при эксплуатации измерение давления не производится, в период подготовки к испытанию следует отыскать в соответствующих местах машины пробки и взамен них установить вентили, от которых отвести импульсные трубки для установки манометров. Манометры следует сгруппировать на одном—двух временных щитах для удобства записи их показаний. Манометры должны быть, по возможности, хорошо освещены естественным светом и не должны находиться под воздействием высокой температуры и вибрации. Это относится к условиям установки всех манометров при испытании, так как высокая температура и постоянная вибрация ведут к их быстрой разверке.

Помимо измерения давления за парораспределительными клапанами, целесообразно фиксировать в ходе испытания величину подъема клапанов и сервомотора (или угол поворота распределительного вала, при поворотном сервомоторе) и давление масла в системе регулирования.

Как указывалось выше, один из методов проведения испытания требует неподвижности парораспределительных органов. Если принят именно такой метод проведения испытания, то при составлении списка подготовительных работ следует наметить

место установки упора, разработать его конструкцию и дать соответствующие эскизы.

Если испытание проводится при свободно перемещающемся парораспределении, установку упора следует предусматривать только для опытов при переменном вакууме.

Упор должен быть установлен таким образом, чтобы он препятствовал открытию клапанов (набору нагрузки).

Применение упора, ограничивающего закрытие клапанов, категорически запрещается.

После того как упор установлен на место, следует дать несколько оборотов синхронизатора для того, чтобы в силу изменения частоты в сети система не могла бы освободиться от упора. Таким образом, упор может передавать значительное усилие, если он ограничивает перемещение сервомотора или усилителя. Поэтому обязательно должна учитываться прочность детали, на которую упор будет передавать это усилие.

5. Работа вспомогательного оборудования

Под вспомогательным оборудованием понимаются в данном случае эжекторная установка и теплообменные аппараты (конденсатор и регенеративные подогреватели).

При испытании турбины характеристика вспомогательного оборудования ограничивается обычно следующим: эжекторная установка характеризуется величиной расхода пара и его параметров перед соплами; теплообменные аппараты характеризуются температурой поступающей и уходящей воды (конденсата, питательной и охлаждающей воды), параметрами конденсируемого пара при входе в аппарат и температурой конденсата этого пара при выходе.

Организация соответствующих измерений не представляет трудностей. Необходимо лишь так расположить гильзы для измерения температуры подогреваемой воды, чтобы была возможность контролировать плотность задвижек на обводных линиях аварийных коробок подогревателей. Гильза для измерения температуры дренажа подогревателя должна устанавливаться в непосредственной близости от него, обязательно до конденсационного горшка.

VI. ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИБОРЫ И ИХ УСТАНОВКА

Давление выше 2 ата измеряется пружинными манометрами. Поправки манометров не должны выходить за пределы, установленные для приборов данного класса. Если используется эксплуатационное измерение, следует проверить, что прибор присоединен к необходимой точке измерения (например, на табличке щитового манометра обозначено «давление перед стопорным клапаном», а в действительности манометр оказывается присоединенным перед дроссельным клапаном).

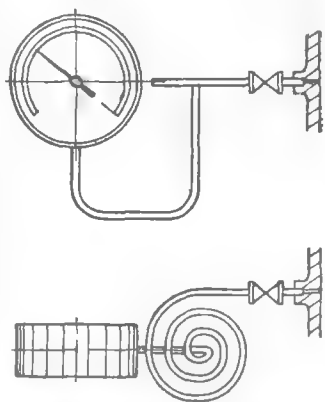
Необходимо проверить наощупь температуру импульсной трубки от места присоединения до манометра — это позволит судить о заполнении ее водой, что необходимо знать для определения поправки к показаниям манометра (особенно в случаях большой разности отметок точки присоединения и места установки манометров). Расположение манометра должно обеспечивать отсчеты показаний без ошибки из-за параллакса.

При измерении давления вновь устанавливаемыми приборами следует присоединение манометра выполнять по типу приводимых эскизов (фиг. 16).

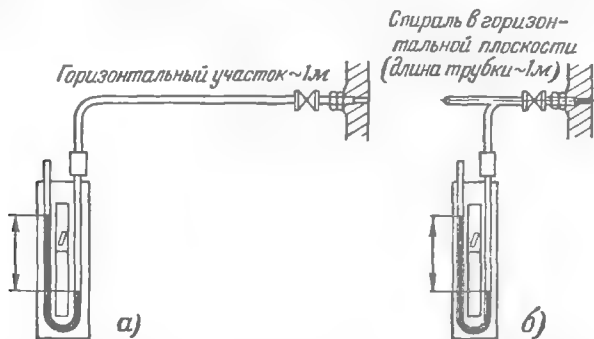
Давление ниже 2 ата измеряется посредством ртутных U-образных приборов с одним открытым коленом. Длина колена должна соответствовать максимальной величине давления. Для обеспечения надежности измерения прибор должен располагаться ниже точки присоединения, а соединительная трубка должна быть заполнена водой (фиг. 17).

Горизонтальный участок импульсной трубки на фиг. 17,а и спираль на фиг. 17,б гарантируют неизменность поправки на разность отметок присоединения и установки прибора при изменении уровня ртути в коленях.

Средний и глубокий вакуум принято измерять одностекольным ртутным вакуумметром с подвижным стаканчиком.



Фиг. 16. Присоединение пружинного манометра.



Фиг. 17. Присоединение ртутного U-образного манометра.

Нижний конец подвижной металлической шкалы прибора, касающийся уровня ртути в стаканчике, должен быть заточен на острие. Правильность нанесения делений должна быть проверена тщательным измерением шкалы, клейменной стальной линейкой. Заметная погрешность должна быть при подсчетах учета на введением соответствующей поправки.

Нониус движка шкалы также должен быть проверен на совпадение крайних его рисок с миллиметровыми делениями шкалы (10 делений нониуса должны соответствовать 9 миллиметрам шкалы).

Для заливки приборов (дифференциальных манометров, U-образных трубок и вакуумметров) следует применять очищенную ртуть.

Значительно точнее измерение давления отработавшего пара в конденсаторе можно производить с помощью ртутного прибора, указывающего величину давления непосредственно (укороченная барометрическая трубка).

Применение этого прибора обеспечивает более высокую точность определения давления отработавшего пара, чем при пользовании вакуумметром. Необходимо лишь ежедневно перед началом опытов проверять исправность прибора; отсутствие воздушного пузырька в запаянном колене при отключении прибора от вакуумного пространства и сообщении его с атмосферой свидетельствует об исправности прибора.

При измерении давления отработавшего пара (вакуума) прибор (вакуумметр или укороченная барометрическая трубка) должен располагаться выше точки присоединения. В качестве соединительной применяется медная трубка внутренним диаметром не менее 8 мм, прокладываемая от точки присоединения до прибора с непрерывным подъемом (без горизонтальных участков).

Проходное сечение крана или вентиля у места присоединения импульсной трубки к конденсатору должно быть не менее 30 мм² (желательно ~ 60 мм²).

Прибор присоединяется к импульсной трубке отрезком толсто-стенной резиновой трубки.

При применении импульсной трубки диаметром в свету менее 8 мм требуется периодическая продувка ее (приблизительно раз в полчаса), что и осуществляется с помощью специального тройника с винтовым зажимом на свободном конце. Во время продувки прибор отключается от импульсной трубки вторым винтовым зажимом.

Для обеспечения правильного измерения температуры необходимо соблюдение следующих общих условий:

1) Гильза должна быть установлена навстречу потоку или перпендикулярно ему.

При перпендикулярной установке конец гильзы должен заходить за ось трубы на ~ 15 мм. При установке против потока (в колене) конец гильзы должен находиться в середине его (по продольной оси трубы). Для измерения температуры влажного пара лучше использовать гильзы, расположенные в мешке вне зоны больших скоростей.

2) Толщина гильзы должна быть минимальной, исходя из условий необходимой прочности. Наружная часть гильзы и бо-
бышка должны быть минимальных размеров и хорошо изолированы (при установке на изолированных трубопроводах). Выпол-

нение этого условия имеет особое значение при измерении высокой температуры.

3) При измерении температуры охлаждающей воды после конденсатора в трубопроводах большого диаметра целесообразно устанавливать 2—3 гильзы в одном сечении трубопровода. Гильзы должны быть расположены радиально, на вертикальных трубопроводах установлены под углом 15° к горизонту, при двух гильзах — диаметрально противоположны, при трех — установлены через 120° .

Длину гильзы при измерении температуры охлаждающей воды рекомендуется принимать не более 300 мм.

Для обеспечения большей точности измерений температура отсасываемой из конденсатора паровоздушной смеси измеряется не в гильзе, а с помощью термометра, вводного в трубопровод отсоса через сальник или отверстие в резиновой пробке (последнее — проще).

Для установки пробки на каждом трубопроводе отсоса в непосредственной близости от конденсатора приваривается бобышка с трубной резьбой 1". В отверстие бобышки заворачивается металлическая пробка, которая перед испытанием заменяется резиновой пробкой с термометром. Возможность присоса наружного воздуха через неплотности сальника или пробки должна быть совершенно исключена (обмазка шеллаком, белилами и т. п.).

При расположении гильзы в трудно доступном месте температура измеряется с помощью термопар с регистрацией по гальванометру или потенциометру. Этот метод при правильной его организации и особенно при записи показаний автоматическим потенциометром оказывается весьма удобным и вполне приемлемым по условиям точности. С организацией такого измерения можно детально ознакомиться по книге В. П. Преображенского, Теплотехнические измерения и приборы, ГЭИ, 1946.

Организация измерения мощности генератора при испытании должна быть поручена электролаборатории станции.

В качестве руководящих указаний по подбору используемых при испытаниях приборов и регистрации их показаний может служить приводимая табл. 8 (составлена применительно к машине среднего давления).

VII. ТРЕБОВАНИЯ К УСТАНОВКЕ ПЕРЕД ИСПЫТАНИЕМ

Подвергающаяся испытанию установка должна находиться в исправном состоянии. Поэтому желательно испытание проводить вскоре после капитального ремонта, причем приурочить его к холодному времени года, что обеспечит получение полноценной поправочной кривой на вакуум и возможно-максимальную загрузку по отбору. Установка должна удовлетворять основным требованиям, приведенным в табл. 9.

Таблица 8

п/п	Наименование измеряемых величин	Применяемый прибор	Максимальное деление шкалы (продольная шкала)	Цена деления шкалы	Периодичность записи показаний	Точность записи показаний
1	2	3	4	5	6	7
1	Давление свежего пара и за парораспределительными клапанами	Пружинный манометр	~1,5 номинального	0,5—1 ат	Раз в 5 мин.	0,1 ат
2	Температура свежего пара	Ртутный термометр	Номинальная +30° С	0,5—2° С	Раз в 5 мин.	0,2—0,5° С
3	Давление в регулируемом (производственном) отборе	Пружинный манометр	~1,5 номинального	0,1—0,2 ат	Раз в 5 мин.	0,01—0,02 ат
4	Давление в регулируемом (теплофикационном) отборе	Пружинный манометр	До 3 ат	0,1 ат	Раз в 5 мин.	0,01 ат
5	Параллельно . Температура пара регулируемого отбора	Ртутный U-образный манометр Ртутный термометр	1 000 мм Производственный отбор до 360° С	1 мм 0,5—1° С	Раз в 5 мин. Раз в 5 мин.	1 мм 0,1—0,2° С
6	Вакуум в конденсаторе	Ртутный вакуумметр	Теплофикационный отбор до 250° С 800 мм	1 мм	Раз в 5 мин.	0,1 мм (без нулиуса 0,5 мм) 0,1° С
7	Температура охлаждающей воды и конденсата в регенерации низкого давления	Ртутный термометр	(0—50° С) (50—100° С)	0,1—0,2° С	Раз в 5 мин.	0,1—0,2° С
8	Температура питательной воды, дренажей в регенерации высокого давления	Ртутный термометр	Максимальная +50° С	0,5—1° С	Раз в 5 мин.	0,1—0,2° С
9	Перепад давления в измерительной диафрагме	Ртутный дифманометр	600—700 мм	1 мм	Ежеминутно	1 мм
10	Мощность генератора	Однофазные ваттметры класса 0,5 по схеме двух ваттметров	—	—	Раз в 2 1/2 мин.	0,5 деления шкалы

Таблица 9

Элемент установки	Требование	Способ контроля
1	2	3
Система парораспределения	1. Нормальная последовательность открытия клапанов (перекрыша) 2. Возможность работы на любом режиме (расход свежего и отборного пара от минимума до максимума) при неизменной установке парораспределения. 3. Отсутствие заеданий в системе (сочленениях, втулках)	Предварительное испытание с изменением расхода свежего пара и в отбор от максимума до минимума
Проточная часть турбины	1. Исправное состояние лопаточного аппарата, исключая случаи, когда дефект веустранним 2. Отсутствие солевых отложений в парозапорных и регулирующих органах, сетках и лопаточном аппарате 3. Удовлетворительное состояние уплотнений	Суточные ведомости, книга ремонтов и ведомость дефектов
Конденсационная установка	1. Чистая поверхность труб и трубных досок 2. Удовлетворительная водяная плотность 3. Удовлетворительная воздушная плотность 4. Удовлетворительное состояние циркуляционных насосов, чистые сопла и диффузоры эжекторов, исправные холодильники, чистые сопла брызгальных бассейнов	Осмотр через люки Химический анализ пробы конденсата при холостом ходе или непосредственное измерение протечки циркуляционной воды при остановленной турбине Допустима протечка не более 0,5% максимального расхода пара в конденсатор Измерение величин выхлопа эжектора или проверка скорости падения вакуума Книга ремонтов, суточные ведомости, ведомость дефектов и осмотр
Система регенерации	1. Нормальная работа схемы при всех режимах 2. Плотность и чистота трубных пучков подогревателей 3. Плотность обводных задвижек и автоматических устройств	Опробование Опробование, книга ремонтов Контроль по температуре конденсата (питательной воды)

Элемент установки	Требование	Способ контроля
1	2	3
Конденсацион- ные горшки, запорная ар- матура пря- мой продув- ки, автомати- ческие водо- отводчики, регуляторы питания	4. Наличие надлежащего раз- мера ограничительных диа- фрагм на трубках отсоса па- ровоздушнoй смеси из подо- гревателей	Ревизия
	Исправное состояние и дей- ствие, отсутствие пропуска в закрытом состоянии	Осмотр по месту и ревизия

VIII. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ

1. Подготовка персонала и пробный опыт

К участию в испытании, помимо специализированного руководящего персонала, привлекается штат наблюдателей, в качестве которых могут быть использованы работники эксплуатационной группы станции; также может быть временно привлечен свободный вахтенный персонал (дублеры) или ремонтный персонал.

Занятый на испытании персонал должен быть до начала работы соответствующим образом инструктирован.

Младший специализированный персонал должен быть ознакомлен руководителем испытания с программой, целями и задачами испытания, особенностями данной турбоустановки, с обязанностями участников работы и т. д. То же в более элементарной форме должно быть сообщено наблюдателям; основная тема беседы с наблюдателями — обучение их правильному пользованию приборами и ведению записи показаний приборов в журнале наблюдений.

О проведении испытания следует довести до сведения всего персонала станции распоряжением или приказом, утвержденным главным инженером станции. Этот документ для сведения дежурного инженера и местного диспетчера должен содержать перечень всех режимов испытания и их ориентировочную длительность.

К моменту окончания монтажа измерительных приборов и подготовительных работ должен быть составлен перечень пунктов наблюдений с разбивкой их по журналам.

Группировка пунктов в журнал должна производиться, исходя из их территориальной близости и отсутствия встречных передвижений наблюдателей при производстве записей по сигналу.

К испытанию следует приступать по окончании всех подготовительных работ.

Испытанию обязательно должен предшествовать пробный опыт, проводимый при режиме, когда в работе находится максимальное количество приборов и участвуют все наблюдатели (при испытании машины с регулируемым отбором пробный опыт проводится при регулируемом отборе, а не на конденсационном режиме).

В ходе пробного опыта основное внимание руководящего персонала должно быть направлено на обучение наблюдателей правильному чтению показаний приборов и правильному ведению журналов наблюдений, что достигается постоянным контролем работы наблюдателей и инструктажем их в ходе опыта.

Записи в журналах наблюдений должны производиться одновременно по общему звуковому сигналу (сирена, колокол и т. п.), даваемому через каждые 5 мин. Записи, которые должны производиться чаще, ведутся по часам или секундомерам.

Руководитель испытания в ходе пробного опыта должен определить рациональные меры обеспечения максимального постоянства параметров свежего пара, расхода конденсата, питательной воды, дренажей и т. п. через измерительные диафрагмы, способы регулировки и контроля этих расходов в ходе испытания.

Пробный опыт обычно занимает один день и состоит из двух промежутков по 2—3 часа, разделенных перерывом.

По окончании пробного опыта последний часовой промежуток записей рекомендуется подвергнуть обработке и, введя к средним значениям измеренных параметров все необходимые поправки, проверить увязку расходного баланса установки и отдельных параметров (давления и температуры свежего пара, давления по ступеням и отработавшего пара и температуры конденсата в системе регенерации). Это поможет уточнить представление о работе всей установки, которое составит у руководителя испытания на основании предварительного изучения материалов эксплуатации и наблюдения за работой установки до испытания и то время пробного опыта.

2. Тарировка диафрагм на паропроводе

Выше указывалось о допустимости использования ненормированных дроссельных приборов для измерения расхода свежего пара при условии тарировки их на месте установки. То же можно сказать о нормированных приборах, установленных на участках, не соответствующих требованиям «Правил № 169».

Тарировка организуется следующим образом.

Создается такая тепловая схема, когда расход свежего пара может быть целиком измерен в виде конденсата. Это достигается

либо отводом дренажа греющего пара регенеративных подогревателей в конденсатор, либо полным отключением регенеративных подогревателей и отборов пара от машины. В качестве истинного расхода принимается расход, подсчитанный по показаниям нормальной диафрагмы, измеряющей расход конденсата отработавшего пара.

При тарировке должно быть обеспечено отсутствие утечек из присосов, могущих исказить результаты измерения.

Число тарировочных опытов в диапазоне изменения расхода от минимума до максимума должно быть не менее 8—10. Длительность каждого опыта — 15 мин. при условии ежеминутной записи перепада давления и параметров пара перед диафрагмой на паропроводе.

При тарировке диафрагмы на паропроводе свежего пара машины с регулируемым отбором, максимальный весовой расход свежего пара в тарировочных опытах определяется максимальной пропускной способностью ч. н. д. турбины и будет меньше максимального расхода свежего пара в условиях испытания (максимального расхода пара через ч. в. д.).

В этом случае тарировка должна быть произведена:

а) в пределах до максимального пропуска пара ч. н. д. турбины — изменением расхода свежего пара;

б) в пределах от максимального пропуска ч. н. д. до максимального расхода свежего пара в условиях испытания — при постоянном расходе пара (несколько меньше максимального при конденсационном режиме), но при изменении давления свежего пара.

Давление свежего пара снижается ступенями, чтобы при остающемся во время тарировки без изменений расходе свежего пара перепад по дифференциальному манометру на паропроводе возрастал. Величина минимального давления пара определяется необходимостью получить по дифференциальному манометру перепад, равный ожидаемому при максимальном расходе свежего пара в условиях испытания.

Из обработки тарировочных опытов должна быть получена зависимость коэффициента расхода тарируемой диафрагмы от перепада давления по дифференциальному манометру.

Расход пара в условиях испытания должен подсчитываться, исходя из фактических параметров перед диафрагмой, перепада в дифференциальном манометре и коэффициента расхода, найденного по тарировочной кривой, соответственно перепаду.

3. Проведение опытов по программе

В ходе испытания контролируется:

а) постоянство режима установки и соответствие параметров этого режима требуемым значениям. Критерием оценки в этом случае могут служить данные, приведенные в табл. 5 и 5а.

В ходе испытания конденсационной машины с регенерацией надлежит особенно следить за соответствием номинальным значениям параметров свежего пара и расхода питательной воды.

При испытании машины с регулируемым отбором κ указанным величинам добавляется также давление в регулируемом отборе.

Номинальное давление и температура свежего пара, а также давление в регулируемом отборе указываются обычно в технических условиях на поставку турбины или же на фирменной табличке машины.

Величина номинального расхода питательной воды зависит от режима работы и схемы установки. Если, например, в схеме установки имеются испарители, то номинальный расход питательной воды для любого режима равен текущему расходу свежего пара плюс производительность испарителей. Если испарителей нет, номинальный расход питательной воды равен расходу свежего пара. Специфичность отдельных схем может определить личную зависимость расхода питательной воды от потребления пара машиной, но и в этих случаях режим работы деаэратора и регенеративных подогревателей должен быть заранее обусловлен.

б) Соответствие фактической тепловой схемы, требуемой при испытании, и режим работы схемы.

Контроль осуществляется руководителем работы каждый раз перед началом испытания и в ходе опытов. Во избежание ошибок следует в период подготовительных работ перед испытанием составить список, в котором и перечислить все операции по переходу от эксплуатационной схемы к испытательной.

Необходимый контроль за режимом работы схемы лучше всего иллюстрируется приводимыми ниже примерами.

При каскадном отводе дренажа из регенеративных подогревателей может быть такой режим, когда выпар в нижестоящем подогревателе вызовет закрытие обратного клапана на линии отбора на этот подогреватель. Это обстоятельство должно устанавливаться путем сравнения давления в отборе на турбине и у подогревателя и по положению обратного клапана на линии отбора. Аналогичное явление может возникнуть, если в линию регенеративного отбора поступает вторичный пар испарителя.

Чрезмерное повышение уровня в бачке гидравлического конденсатора уплотнения может повести к значительной утечке конденсата через переливную трубу бачка и, следовательно, к ошибке в измерении расхода конденсата.

Погрешность в измерении расхода конденсата может возникнуть также при большой разнице уровня в паровом пространстве конденсатора в начале и в конце опыта.

Работа регенеративного подогревателя при высоком, но неизменном уровне в паровом пространстве может, помимо ухудшения показателей работы подогревателя, привести в некоторых случаях к ошибке в измерении расхода конденсата отработавшего

пара, если уровень достигнет воздухоудаляющей трубы и дренаж станет перетекать в нижестоящий подогреватель.

Характеристика режима работы установки в указанном выше смысле (п. «а» и «б») должна заноситься в дневник руководителя испытания. Наряду с этим в дневнике должна указываться краткая характеристика данного опыта (мощность, величина регулируемого отбора, положение органов регулирования и т. д.) и промежутки времени, в котором лежат записи, подлежащие обработке.

Значения основных параметров в пределах отмеченного промежутка должны отличаться максимальным постоянством и быть возможно близкими к номинальным значениям.

Наличие такого рода заметок оказывает большую помощь при выборе этого промежутка в процессе окончательной обработки результатов, ибо при разметке журналов наблюдений требуется просматривать не все записи, а лишь те, которые относятся к указанному периоду времени. Окончательное суждение о режиме машины в указанный промежуток времени руководитель испытания составляет на основе просмотра журналов наблюдений совместно с дневником, учитывая все имеющиеся там замечания.

Для получения надежных результатов при условии, если колебания параметров и режима опыта не превышают величин, указанных в табл. 5 и 5а, а периодичность записей показаний приборов соответствует указанной в табл. 8, вполне достаточно иметь записи показаний приборов на каждый опыт в течение одного часа. Следует отметить некоторые особенности проведения опытов при переменном вакууме.

Эти опыты, проводимые при неподвижных органах парораспределения, могут иметь длительность 10 мин. каждый при условии, если запись всех параметров производится ежеминутно.

При проведении этих опытов производится запись только следующих параметров и величин: давление и температура свежего пара, давление пара в контрольной ступени, давление отработавшего пара, мощность на зажимах генератора и расход свежего пара. ▽

Изменение давления отработавшего пара может достигаться либо впуском воздуха в конденсатор через специальную трубу с регулировочным вентилем (диаметром 1" для конденсатора площадью около 3 000 м²), либо, если скорость падения вакуума при отключении эжектора значительна (> 5 мм/мин.), посредством прикрытия задвижки на линии паровоздушной смеси перед первой ступенью эжектора.

Регулировочным ходом задвижки во втором случае являются 2—3 оборота ее маховика до полного закрытия. Опыт при заданном значении вакуума можно начинать по прошествии 5 мин. после установления необходимого вакуума при условии колебания его на ± 1 мм от выбранной величины.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

1. ОБРАБОТКА ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

1. Прссмотр журналов наблюдений, разметка

О выборе подлежащего обработке промежутка записей в журналах наблюдений указывалось выше. Разметка производится непосредственно на журналах наблюдений, желательно — цветным карандашом. На полях журнала, внутри отмеченного промежутка проставляется номер данного опыта. Образец размеченного журнала наблюдений приведен на стр. 48 и 49.

2. Подсчет средних величин и поправки

В основе всей обработки результатов испытаний лежат средние значения величин, вычисленные по записям в журналах наблюдений в пределах размеченных промежутков.

Подсчитанные средние величины следует вносить в специальный журнал, который рекомендуется оформлять по типу журнала наблюдений, причем в заголовке журнала средних величин выписывается содержание заголовка обрабатываемого журнала наблюдений (наименование и номера пунктов наблюдения и номера приборов).

В целях ускорения подсчета средних величин рекомендуется следующий способ: средняя величина должна вычисляться лишь из меняющихся цифр записи. Не меняющиеся цифры просто приписываются впереди средней из меняющихся цифр.

Например, надлежит подсчитать среднюю температуру свежего пара, изменяющуюся в пределах от 400 до 410° С.

Вычисляем среднюю величину из чисел сверх 400° С (пусть она будет 3,8° С), тогда средняя температура свежего пара составит 403,8° С.

К средним величинам вводятся поправки на прибор, определяемые по протоколу проверки прибора или графику, построенному в соответствии с этим протоколом. Необходимо отметить, что величина поправки должна находиться по протоколу или графику для показания прибора (а не для истинной величины).

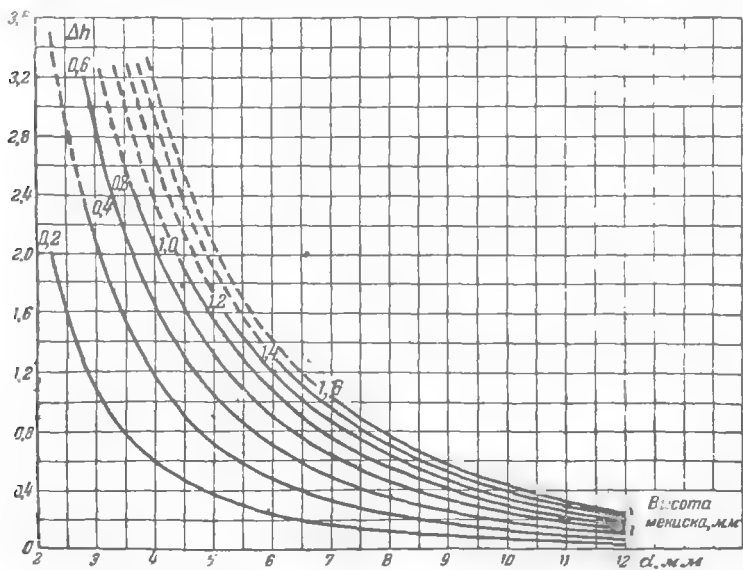
ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ № 1

Личные наблюдения										Время наблюдений		часы		м и. н.		Единицы измерения										°C	
										</																	

4 Испытание турбогенераторов		1	
39,3	39,5	15	20
27,6	28,1	25	27,9
319,265	322,265	30	27,8
325,264	325,264	35	27,8
325,268	325,268	40	27,3
335,274	335,274	45	27,8
332,268	332,268	50	27,9
325/267	325/267	55	27,5
330,274	330,274	00	27,0
325,270	325,270	05	27,0
319,262	319,262	10	27,0
320,265	320,265	15	27,5
329,268	329,268	20	28,0
319,260	319,260	25	27,8
0,72	0,72	401,2	401,5
0,71	0,71	405,5	405,0
0,72	0,72	404,7	405,0
0,73	0,73	401,5	401,5
0,72	0,72	403,8	403,8
0,71	0,71	405,0	405,0
0,75	0,75	405,3	405,3
0,72	0,72	405,4	405,4
0,72	0,72	405,5	405,5
0,70	0,70	407,4	407,4
0,72	0,72	405,8	405,8
42,1	43,0	41,8	42,0
42,5	43,5	41,5	42,5
41,0	42,0	41,0	42,0
43,0	44,0	42,0	43,0
42,1	43,0	41,5	42,5
94,3	95,0	94,3	95,0
405,0	404,7	405,2	404,5
39,3	39,5	39,8	39,8

Далее вводится поправка на установку прибора (для пружинных и ртутных манометров — на столбик воды в соединительной трубке от места присоединения до прибора) и на условия работы прибора (для ртутных термометров, ртутных манометров и вакуумметров).

Для термометров эта последняя поправка учитывает отличие температуры выступающего из гильзы столбика ртути от измеряемой температуры и подсчитывается по формуле в зависимости от температуры и высоты выступающего столбика ртути основного термометра. Поправкой на условия работы ртутных



Фиг. 18. Поправка на капиллярность для ртутных приборов с одним столбиком ртути.

манометров и вакуумметров учитываются изменения удельного веса ртути в приборе в зависимости от ее температуры, определяемой по специальному термометру. Этот термометр подвешивается к прибору так, чтобы его шарик находился приблизительно по середине ртутного столбика.

Вторая поправка, вносимая к показаниям ртутных приборов, учитывает изменение высоты столбика ртути вследствие явления капиллярности. Она вносится лишь к показаниям приборов с одной трубкой и определяется по номограмме фиг. 18 соответственно фактическому внутреннему диаметру стеклянной трубки и измеренной при отключенном приборе высоте мениска ртути.

Внутренний диаметр трубок принимается средний — по измерению у верхнего и нижнего конца ее.

Табл. 10 и образец журнала средних с внесенными поправками поясняют метод подсчета поправок и показывают необходимую точность вычисления средних величин и поправок.

3. Определение состояния пара и воды

Теплосодержание, удельный вес и объем пара и воды, температура насыщения и прочие величины, в определении которых возникает необходимость при обработке результатов испытаний, принимаются по паровым таблицам или is -диаграмме, составленным проф. М. П. Вукаловичем (Госэнергоиздат, 1946 или Машгиз, 1950).

При обработке надлежит руководствоваться также следующим.

При определениях, требующих большой точности (например определение удельного объема перегретого пара для подсчета расхода пара по дроссельному прибору), следует построить по данным паровых таблиц график зависимости искомой величины от определяющих параметров в требующихся при обработке пределах изменения последних.

Масштаб графика выбирается соответственно требуемой точности.

При определении величины располагаемого и использованного теплопотока по is -диаграмме величина теплопотока должна определяться как арифметическая разность теплосодержания пара в начальной и конечной точке процесса расширения, но не путем измерения разности теплосодержания с помощью линейки непосредственно по диаграмме.

1. Подсчет расхода при измерении дроссельным прибором

Поскольку при испытании рекомендуется применение лишь нормальных острых диафрагм и нормальных сопел, подсчет расхода производится на основании коэффициентов расхода, приведенных в «Правилах № 169». Ниже приводятся краткие выдержки из этих правил, а также ранее изданного проекта «Нормы измерения расхода жидкостей, газов и пара с помощью дроссельных приборов», составленного Я. М. Рубинштейном, Госэнергоиздат, 1933.

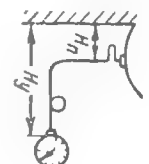
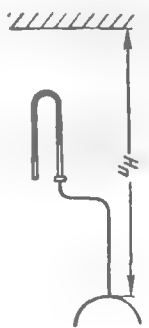
Приводимые выдержки достаточны для правильного выбора места установки дроссельного прибора, расчета его и подсчета расхода по данным произведенных измерений.

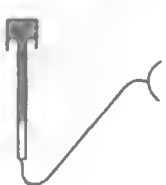
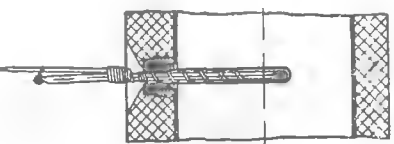
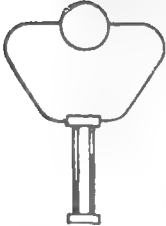
Расчетная формула:

$$G = K \cdot a \cdot \epsilon \cdot K_t \cdot d^2 \sqrt{\frac{h}{U}} \text{ кг час};$$

здесь K — коэффициент, зависящий от удельного веса вещества, залитого в дифференциальный манометр. При пользовании дифференциальным манометром, залитым ртутью и над ней водой, при температуре ртути 0°C , значение коэффициента $K = 0,04445$; при применении ртути и заполнении соединительных трубок от диафрагмы к дифференциальному манометру воздухом — $K = 0,04518$

Поправки к средней наблюдаемой величине показаний прибора

Наименование прибора	Эскиз установки	Поправка на прибор	Поправка на установку прибора	Поправка на условия работы прибора
1 Манометр пружинный		По паспорту поправки	$\Delta p = \frac{H_y - H_n}{10} \text{ ат}$ H_n — отметка установки H_y — отметка присоединения H_y и H_n , м	Нет
2 Манометр ртутный		В зависимости от результатов проверки шкалы контрольной линейкой	$\Delta h = \frac{(H_y - H_n) - H_a}{0,136} \text{ мм}$ рт. ст. H_y — отметка установки (по нулю шкалы) H_n — отметка присоединения H_a — средний уровень ртути в левом (присоединенном) колене без учета среднего уровня них H_y , H_n и H_a , м	$-\Delta h = 0,0001815 t \times (H_{np} + H_a) \text{ мм рт. ст.}$ $H_{np} + H_a$ — средний наблюдаемый перепад, мм рт. ст. t — температура столбика ртути по привязному термометру

3 Вакуумметр ртутный		1. В зависимости от результатов проверки шкалы контрольной линейкой 2. По номограмме фиг. 17 в зависимости от внутреннего диаметра трубки и высоты мениска	Нет	$-\Delta h = 0,0001815 t \cdot H$ H — средняя наблюдаемая высота столбика ртути, мм рт. ст. t — температура столбика ртути по привязному термометру
4 Термометр ртутный		По паспорту поправки	Нет	$\Delta t = (t_n - t_{noz}) \left(\frac{t_n - t_{a,cm}}{6000} \right) \text{ } ^\circ\text{C}$ t_n — наблюдаемая, средняя за опыт, температура, $^\circ\text{C}$ t_{noz} — деление, до которого термометр погружен в гильзу $t_{a,cm}$ — температура выступающего столбика, по показанному нулевому термометра
5 Дифференциальный нометр ртутный		В зависимости от результатов проверки шкалы контрольной линейкой	Нет	$-\Delta h = 0,0001815 t \times (H_{np} + H_a) \text{ мм рт. ст.}$ $H_{np} + H_a$ — средний наблюдаемый перепад, мм рт. ст. t — температура столбика ртути по привязному термометру

Установка _____
 Опыт № _____ Дата опыта _____ 19 _____ г

ЖУРНАЛ СРЕДНИХ ВЕЛИЧИН № _____

Пункты наблюдений		Время наблюдений		Объект наблюдений												
Порядковый № наблюдения	час.	мин.	сек.	Давление		температура воздуха	Показания интальтов	Вакуум в штотор	Температура в штотор	Температура в штотор	Температура в штотор	Температура в штотор				
				по образцу	по прибору											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
													14	15	16	17
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					

(для температуры ртути 0°C); измерение перепада давления водяным дифференциальным манометром требует подстановки в формулу $K=0.01252$;

- α — исходный коэффициент расхода, определенный в зависимости от d/D , к коэффициенту α с поправками, если это требуется. Вводятся поправки на шероховатость трубопровода и недостаточную остроту кромки;
- ε — множитель, учитывающий расширение пара или газа при протекании через диафрагму;
- K_1 — поправка на расширение отверстия дроссельного прибора;
- d — диаметр отверстия дроссельного прибора, измеренный при температуре около 20°C , мм;
- h — средний за время опыта перепад по дифференциальному манометру, в миллиметрах столба рабочей жидкости;
- v — удельный объем измеряемого вещества, определяемый соответственно температуре и давлению перед дроссельным прибором по паровым таблицам Вукаловича.

Коэффициенты в приведенной выше формуле расхода выбираются по таблицам и графикам, данным в приложении. Там же приведены эскизы нормальных сопел и диафрагм и указаны нормы установки их.

При подсчете расхода на основании результатов измерения среднюю за опыт величину перепада в дифференциальном манометре следует привести к 0°C . Тогда коэффициент K в формуле будет постоянным и независимым от температуры столбиков ртути в дифференциальном манометре. Если колебания перепада ртути по дифференциальному манометру достигают 10% от его средней величины, в основу подсчета следует принять не корень квадратный из среднего за опыт перепада, а среднюю величину корня из отдельных перепадов.

Наличие на кромке диафрагмы диаметром $d < 150$ мм видимых в микроскоп (инструментальный, универсальный) раковин, заусенцев и т. п., а при диаметре $d > 150$ мм — видимой невооруженным глазом кромки требует при подсчете расхода внесения поправки на недостаточную остроту кромки. Эта поправка вносится к исходному коэффициенту расхода, определяемому в зависимости от отношения диаметров расточки диафрагмы и трубопровода.

В практических условиях при расчетах необходимо вводить поправку на шероховатость трубопровода.

5. Расходный баланс установки

Объем обработки данных испытания определяется целевой установкой испытания. Минимальный объем определяется суммой данных, необходимых для составления тепловой характеристики машины по установленной Министерством электростанций

форме. Таким образом, при обычном эксплуатационном испытании расходный баланс установки составляется постольку, поскольку это требуется для точного определения расхода пара и тепла на выработку электроэнергии.

Принципиальные указания по определению отдельных составляющих расходного баланса были даны в разделе IV, п. 2 первой части.

Руководящие указания по подсчету расхода с помощью дроссельных приборов приведены в предыдущем разделе.

Определение расхода пара на регенеративные подогреватели из уравнений теплового баланса подогревателей не представляет особой сложности, поэтому разбор этого вопроса здесь опускается.

II. ПРИВЕДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ К НОМИНАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ И ПОСТРОЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСХОДА ПАРА ОТ МОЩНОСТИ

Результаты испытания должны быть пересчитаны от условий опыта к номинальным условиям, а именно, к нормальной тепловой схеме установки (в том случае, если схема при испытании отличалась от нормальной схемы) и к номинальным параметрам теплового процесса. При этом поправки, учитывающие отличие тепловой схемы в условиях испытания от нормальной и отличие условий работы этой схемы от принятых за номинальные, вносятся к измеренной при испытании величине мощности генератора, а расход свежего пара при этом полагается неизменным. При приведении же к номинальным параметрам процесса расширения пересчету подвергается и расход свежего пара, и мощность генератора (с внесенными поправками на схему и режим ее работы).

В данном разделе дается методика приведения результатов испытания к номинальным условиям как для конденсационной турбины, так и для турбины с регулируемым отбором и приводятся численные примеры обработки.

1. Конденсационный турбоагрегат с регенерацией

А. Приведение к нормальной тепловой схеме

При разборе этого вопроса принято, что турбоагрегат испытывался по обычно принимаемой при испытании тепловой схеме: подогрев конденсата в атмосферном деаэраторе осуществляется посторонним паром, машина работает только с двумя нерегулируемыми отборами — на подогреватель высокого давления и на подогреватель низкого давления.

Методика пересчета основывается на следующем.

Величины поправок на схему и режим ее работы будут определяться отличием расхода в отбор в условиях испытания от

расхода в отбор при нормальных условиях и нормальной схемы, а также соотношением величин удельной выработки потока пара, идущего в отбор, и удельной выработки потока пара, проходящего через все ступени машины.

Для отборного пара удобно пользоваться величиной относительной удельной выработки. Последняя определяется отношением использованного перепада тепла (от состояния свежего пара до отбора) к полному перепаду тепла:

$$a_n = \frac{i_0 - i_n}{i_0 - i_2}.$$

На фиг. 19 приведена кривая относительной выработки пара отбора, построенная по данным испытания нескольких машин. Этой кривой можно пользоваться при обработке результатов испытания для определения относительной выработки отборного пара. Величина относительной выработки определяется по отношению $\frac{p_n}{p_0}$ при экономическом режиме. При изменении нагрузки

относительную выработку можно полагать неизменной.

Удельная выработка пара, проходящего в конденсатор при частичной и экономической мощности, может быть определена с достаточной для целей приведения точностью по формуле:

$$a = \frac{h_0 \eta_{03}}{860},$$

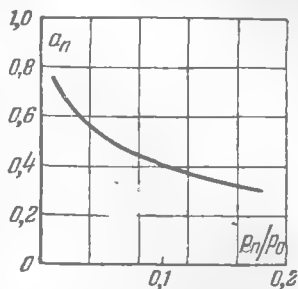
где h_0 — располагаемый перепад тепла от состояния свежего пара до давления отработавшего пара;

η_{03} — электрический относительный к. п. д. (принимается в пределах 0,72 ÷ 0,76).

Пользуясь приведенными данными, легко определить поправку к мощности по заданному изменению в расходе отборного пара. Нужно, разумеется, учитывать, что предлагаемый метод является приближенным и может быть использован для вычисления поправок при относительно небольших изменениях в количестве отбора. При значительных поправках вычисление их следует вести на основании фактических величин удельных выработок в условиях опыта.

Изменение в количестве отбора при точном подсчете следует находить из просчета теплового баланса всей регенеративной схемы.

Следует заметить, что изменение расхода пара через ступени за камерой отбора, являющееся результатом пересчета схемы при введении поправок, влияет на параметры и, в частности, на давление отбираемого пара. Это обстоятельство может лишь незна-



Фиг. 19. Относительная выработка пара промежуточных отборов.

читательно сказаться на точности приведенной величины и учитывается обычно только при очень точных расчетах.

Для принятой в качестве примера схемы номинальный отбор п. в. д. должен быть определен из уравнения его теплового баланса:

$$D_n^{br} = \frac{D_{пит}^n (i_{пит}^n - i_{пит}'^n)}{i_n^1 - i_{кпз}},$$

где $D_{пит}^n$ — номинальный расход питательной воды через п. в. д. обычно полагается равным расходу свежего пара на машину (включая расход на эжектор): $= D_0^n$.

$i_{пит}^n$ — теплосодержание питательной воды после подогревателя; принимается равным теплосодержанию воды, определенному для условий опыта;

$i_{кпз}$ — теплосодержание дренажа п. в. д.;

$i_{пит}'^n$ — номинальное теплосодержание питательной воды перед п. в. д.; эта величина находится по таблицам соответственно принятой температуре воды после деаэратора и давлению в питательной магистрали перед п. в. д.;

$i_n^1 - i_{кз}$ — теплоиспользование пара первого отбора в п. в. д. принимается по данным опыта.

Поправка к мощности в связи с изменением отбора от D_r^1 в условиях опыта до D_n^{br} определяется:

$$\Delta N_n^1 = (D_n^1 - D_n^{br}) [a(1 - a_1)],$$

где D_n^1 и D_n^{br} — расход пара первого отбора на п. в. д. соответственно в условиях опыта и номинальных условиях;

a — удельная выработка пара, проходящего в конденсатор (точно $a = \frac{i_0 - i_2}{0,86 \text{ ккал/кг}}$);

a_1 — относительная выработка пара первого отбора (точно $a_1 = \frac{i_0 - i_n^1}{i_0 - i_2}$; приближенно по кривой

фиг. 19, соответственно $\frac{p_n^1}{p_0}$ для экономического режима).

Величина отсутствовавшего при проведении испытания отбора на деаэратор определяется с учетом вносимого в деаэратор тепла с дренажем п. в. д. по уравнению:

$$D_n^d = \frac{D_0 (i_{кд}^n - i_{кд}'^n) - D_r^{br} (i_{кпз} - i_{кд}'^d)}{i_n^{11} - i_{кд}'^d}$$

(здесь дается окончательный вывод)

Обозначения:

$D_{\text{н}}$ — расход свежего пара, включая расход пара на эжектор;

$i_{\text{нв}}^{\text{н}}$ — номинальное теплосодержание питательной воды по выходе из деаэратора (для деаэраторов атмосферного типа обычно принимается 103—105 ккал/кг);

$i_{\text{кд}}^{\text{н}}$ — теплосодержание конденсата перед деаэратором (в данном случае $i_{\text{кд}}^{\text{н}}$ — теплосодержание конденсата по выходе из п. н. д.);

$D_n^{\text{лв}}$ — расход пара первого отбора на п. в. д. при номинальных условиях его работы (в данном случае $D_n^{\text{лв}}$ — дренаж п. в. д., поступающий в деаэратор);

$i_{\text{нз}}$ — теплосодержание дренажа п. в. д., поступающего в деаэратор;

$i_n^{\text{лв}}$ — теплосодержание пара второго отбора турбины (нормально используемого для подогрева конденсата в деаэраторе).

Поправка к мощности, учитывающая отбор на деаэратор, в окончательном виде выражается следующим образом:

$$\Delta N_n^{\text{д}} = -D_n^{\text{н}}[a(1-a_2)] + \frac{D_n^{\text{д}} \Delta i_{\text{к1}}}{\Delta i_n^{\text{лв}} + \Delta i_{\text{н1}}} [a(1-a_3)];$$

здесь $D_n^{\text{н}}$ — часовой расход пара второго отбора на деаэратор (найденный по предыдущему уравнению теплового баланса);

a — удельная выработка конденсационного потока пара при данном режиме;

a_2 и a_3 — относительная выработка пара второго и третьего отборов (по кривой соответственно $\frac{P_n}{P_0}$);

$\frac{D_n^{\text{д}} \Delta i_{\text{к1}}}{\Delta i_n^{\text{лв}} + \Delta i_{\text{н1}}}$ — изменение в расходе пара третьего отбора на п. в. д., выраженное через отбор на деаэратор.

В этом выражении:

$\Delta i_{\text{к1}}$ — прирост теплосодержания основного конденсата в п. н. д.;

$\Delta i_n^{\text{лв}}$ — теплоиспользование пара третьего отбора в п. н. д.

$$(\Delta i_n^{\text{лв}} = i_n^{\text{лв}} - i_{\text{кн1}}).$$

Следует сказать, что слагаемым

$$\frac{D_n^{\text{д}} \Delta i_{\text{к1}}}{\Delta i_n^{\text{лв}} + \Delta i_{\text{н1}}} [a(1-a_3)]$$

ввиду его малости в большинстве случаев можно пренебрегать.

Ниже дается форма подсчета поправки на отклонение режима п. в. д. от номинального и поправки на отсутствие отбора на деаэратор при испытании.

В табл. 11 приведен пример подсчета этих поправок для одного опыта.

Следует еще раз подчеркнуть, что вычисление поправок с использованием данных фиг. 19 допустимо без ущерба для точности в тех случаях, когда поправка составляет не более $1 \div 1\frac{1}{2} \%$ измеренной мощности.

В данном примере поправка на деаэратор превышает указанный предел, поэтому подсчет должен считаться ориентировочным.

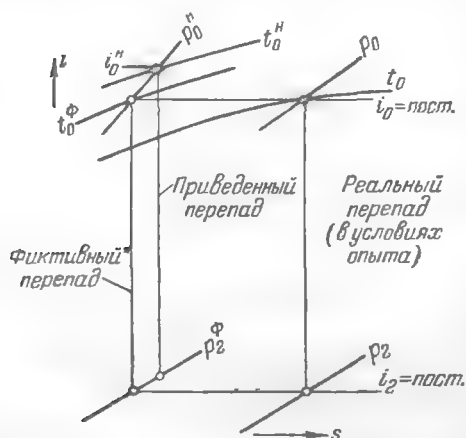
Б. Приведение к номинальным начальным и конечным параметрам пара

Как уже указывалось в разделе II первой части, наилучшим методом приведения следует считать метод, в основу которого положено условие неизменности открытия парораспределительных клапанов. В частности,

при проведении серии опытов при переменном давлении в конденсаторе совершенно надежные результаты испытания могут быть получены лишь при применении этого метода.

Только в некоторых случаях эксплуатационного испытания (турбины с дроссельным парораспределением без перегрузки или сопловым с большим числом групповых клапанов) можно предпочесть более простой способ приведения «при неизменной мощности» или «при неизменном расходе пара».

Фиг. 20. Схема пересчета на номинальные параметры в i - s -диаграмме.



Ввиду широкой известности этих методов, описание их здесь опускаем и ограничимся лишь указанием, что оба эти метода для конденсационных машин с чисто дроссельным парораспределением или сопловым парораспределением с большим числом групповых клапанов одинаково применимы.

Во всех иных случаях предпочтительно приведение «при неподвижном парораспределении».

Все соображения, положенные в основу излагаемой ниже методики пересчета опытов на номинальные параметры, даны ранее в разделе «Выбор методики проведения испытания».

Поэтому ниже приводится непосредственно схема пересчета.

Положим, что опыт был проведен при отклоняющихся от номинальных значений давления и температуре свежего пара. Давление stráботавшего пара также отличалось от принятого за номинальное. Рассмотрим последовательно весь ход пересчета (фиг. 20).

1) Поправка на начальное давление

Известно, что все адиабатические процессы, если начальная точка их находится на одной линии $p v = \text{const.}$ (линии дросселирования), а отношение $\frac{p_2}{p_0}$ одинаково, характеризуются одинаковой величиной теплоперепада, если все проходные сечения турбины остаются без изменений.

Сказанное совершенно справедливо для процессов, протекающих в области перегретого пара, и практически точно в случае окончания процесса в области ниже пограничной кривой.

Расход пара для этих процессов изменяется пропорционально начальному давлению.

Тогда при номинальном начальном давлении p_0^H и при том же теплосодержании i_0 , что и в условиях опыта, расход свежего пара будет:

$$D_0^\phi = D_0 \frac{p_0^H}{p_0}$$

где D_0^ϕ — расход свежего пара, приведенный к номинальному начальному давлению („фиктивный“);

p_0 — давление свежего пара в условиях опыта;

D_0 — расход свежего пара в условиях опыта.

Соответственно приведенная мощность и давление в конце процесса расширения:

$$N_s^\phi = N_s' \frac{p_0^H}{p_0} \quad \text{и} \quad p_2^\phi = p_2 \frac{p_0^H}{p_0};$$

здесь N_s' — мощность на зажимах генератора в условиях опыта с поправкой на схему и режим ее работы

$$N_s' = N_s + \Sigma \Delta N_{cx};$$

p_2 — давление за турбиной в условиях опыта;

p_2^ϕ — конечное давление, при котором „фиктивный“ перепад от номинального начального давления равняется перепаду в условиях опыта.

2) Поправка на начальную температуру

Начальная температура „фиктивного“ процесса в общем случае отлична от номинальной. Если номинальное теплосодержание перед турбиной (соответствующее p_0^H и t_0^H) обозначить i_0^H , то температура может быть подсчитана как

$$t_0^\phi = t_0^H - \frac{i_0^H - i_0}{c_p^H},$$

что справедливо при практически наблюдаемых отклонениях начальной температуры от номинального ее значения.

№ п/п	Наименование	Объемные	Размещение	№ опыта	Среднее значение
1	Расход свежего пара, включая эжектор	D_0	м ³ /час	71,1	По результатам обработки первичных данных
2	Относительная выработка первого отбора	α_1	—	0,34	По кривой относительной выработки
3	Относительная выработка второго отбора	α_2	—	0,50	Фиг. 19 или из подсчетов
4	Теплосодержание питательной воды по свеж. п. в. д.	t_{num}	ккал/кг	129,8	Соответственно t_{num} и p_{num} по из.
5	Номинальное теплосодержание питательной воды перед п. в. д.	t_n	ккал/кг	103,8	Соответственно принятой t_{v0} и p_{num}
6	Номинальное повышение теплосодержания питательной воды в п. в. д.	Δt_{num}	ккал/кг	26,0	$t_{num} - t_n$
7	Теплоиспользование пара первого отбора	Δt_n	ккал/кг	553,3	По результатам обработки первичных данных
8	Номинальный расход пара из п. в. д.	D_n	м ³ /час	3,33	$D_n = \frac{D_0(t_{num} - t_n)}{t_n - t_{n3}}$
9	Расход пара на п. в. д. в условиях опытов	D_1^n	м ³ /час	4,03	По результатам обработки первичных данных
10	Изменение в расходе пара на п. в. д.	ΔD_1^n	м ³ /час	±0,70	$\Delta D_1^n = D_1^n - D_n$
11	Поправка к мощности на п. в. д.	ΔN_1^n	±0,12	$\Delta N_1^n = a(1 - \alpha_1) \cdot \Delta D_1^n$	

12	Номинальное теплосодержание питательной воды после деаэратора	t_{v0}	ккал/кг	113,1	Соответственно принятой номинальной температуре
13	Теплосодержание конденсата перед деаэратором	t_{v0}	ккал/кг	55,1	По результатам обработки первичных данных
14	Номинальное повышение теплосодержания конденсата в деаэраторе	Δt_{v0}	ккал/кг	18,0	$\Delta t_{v0} = t_{v0} - t_{v0}^n$
15	$D_0(t_{v0}^n - t_{v0}^n)$	—	ккал/час	3,41 · 10 ⁶	—
16	Теплосодержание дренажа и в. д.	t_{n3}	ккал/кг	131,0	По результатам обработки первичных данных
17	$t_{n3} - t_{v0}$	—	ккал/кг	75,9	—
18	$D_n(t_{n3} - t_{v0}^n)$	—	ккал/час	0,25 · 10 ⁶	—
19	Потребление тепла отбортного пара в деаэраторе	$D_n(t_{n3} - t_{v0}^n)$	ккал/час	3,16 · 10 ⁶	По результатам обработки первичных данных
20	Теплоиспользование пара второго отбора в деаэраторе	$t_{n3} - t_{v0}$	ккал/кг	606,9	$D_0(t_{n3} - t_{v0}^n) - D_n(t_{n3} - t_{v0}^n)$
21	Расход пара второго отбора на деаэратор	D_0	м ³ /час	±5,2	$D_0^n = \frac{D_0(t_{n3} - t_{v0}^n) - D_n(t_{n3} - t_{v0}^n)}{t_{n3} - t_{v0}^n}$
22	Поправка к мощности в связи с отступлением отбора на деаэратор	ΔN_0^n	тыс. кВт	±0,65	$\Delta N_0^n = a(1 - \alpha_2) D_0^n$
23	Поправка к расходу в ч. н. д.	ΔD_0^n	м ³ /час	±5	$\Delta D_0^n = \Delta D_1^n + D_0^n$
24	Суммарная поправка к мощности на свеж. п. в. д.	$\Delta N_{св}$	тыс. кВт	±0,53	$\Delta N_{св} = \Delta N_1^n + \Delta N_0^n$

Здесь t_0^{ϕ} — начальная температура „фиктивного“ процесса; t_0'' и c_p'' — соответственно, номинальная температура свежего пара и истинная теплоемкость пара при номинальных параметрах.

Иначе „фиктивная“ начальная температура может быть просто определена по is -диаграмме или вспомогательному графику, построенному по данным таблиц водяного пара в зависимости от величины i_0 и p_0'' .

Расход свежего пара при номинальных начальных параметрах

$$D_0^{np} = D_0 \frac{p_0''}{p_0} \sqrt{\frac{T_0^{\phi}}{T_0''}},$$

а мощность генератора

$$N_s^{np} = N_s' \frac{p_0''}{p_0} \sqrt{\frac{T_0^{\phi}}{T_0''}} \left(1 + \frac{\alpha_{t0}}{100}\right),$$

α_{t0} — поправка на отклонение начальной температуры „фиктивного“ процесса t_0^{ϕ} от номинальной t_0'' по поправочной кривой.

Если

$$\frac{p_0''}{p_0} \sqrt{\frac{T_0^{\phi}}{T_0''}} = \frac{D_0^{np}}{D_0},$$

тогда

$$\bar{N}_s^{np} = N_s' \frac{D_0^{np}}{D_0} \left(1 + \frac{\alpha_{t0}}{100}\right).$$

3) Поправка на давление отработавшего пара

Изменение давления отработавшего пара конденсационной турбины в тех пределах, в каких это практически имеет место, не влияет на расход пара через турбину.

Следовательно, при пересчете данных опыта, приведенных к номинальным начальным параметрам, на желаемое давление отработавшего пара величина приведенного расхода пара остается неизменной. Изменяется лишь мощность, как следствие изменения величины располагаемого перепада и к. п. д. последней или группы последних ступеней.

Соответствующая поправка ΔN определяется по экспериментальной «сетке поправок на вакуум» прямо в киловаттах и вносится с соответствующим знаком к мощности, приведенной к номинальным начальным параметрам. Здесь важно отметить следующую деталь, касающуюся определения приведенного давления отработавшего пара.

Как показано в упоминавшейся ранее статье А. С. Зильбермана и Г. С. Смолярова, равенство использованного перепада и к. п. д. последней или группы последних ступеней будет соблюдено, если давление за последней ступенью при изменении весо-

вого расхода пара через нее положить меняющимся пропорционально весовому расходу.

В нашем случае, когда расход через последние ступени вместо D_0 становится D_0^{np} , для сохранения неизменным режима последних ступеней, конечное давление должно быть.

$$p_2^{np} = p_2 \frac{p_0^k}{p_0} \sqrt{\frac{T_0^k}{T_0}} = p_2 \frac{D_0^{np}}{D_0}.$$

Таким образом приведенная мощность $\bar{N}_s^{np}$ отвечает расходу свежего пара D_0^{np} и располагаемому перепаду тепла от p_0^k и t_0^k до p_2^{ϕ} .

Использование этого „приведенного“ перепада с „опытным“ внутренним к. п. д. возможно по условиям работы последних ступеней, лишь тогда, когда за последней ступенью установится давление p_2^{np} , а не p_2^{ϕ} , определяющее величину теплового перепада в is -диаграмме.

Следовательно, для приведения мощности $\bar{N}_s^{np}$ к желаемому давлению в конденсаторе величину поправки по сетке нужно находить, считая конечным давлением приведенного процесса расширения p_2^{np} .

Таким образом, приведенная с учетом всех отклонений (схемы, режима ее работы и параметров процесса расширения) мощность на зажимах генератора будет:

$$N_s^{np} = N_s' \cdot \frac{D_0^{np}}{D_0} \left(1 + \frac{\alpha_{t0}}{100} \right) + \Delta N.$$

Приняв обозначения:

$$A = \frac{D_0^{np}}{D_0} = \frac{p_0^k}{p_0} \sqrt{\frac{T_0^k}{T_0}} \text{ и } \beta_{t0} = \left(1 + \frac{\alpha_{t0}}{100} \right),$$

получим формулу приведенной мощности в окончательном виде:

$$N_s^{np} = A \beta_{t0} N_s' + \Delta N.$$

Приведенная выше формула:

$$p_2^{np} = p_2 \frac{D_0^{np}}{D_0}$$

применима для случая испытания чисто конденсационной машины.

Эта формула пригодна также для случая конденсационной машины с регенерацией, если отношение расхода о работающего пара к расходу свежего пара $\frac{D_2}{D_0}$ остается неизменным при пере-

счете D_0 (такое допущение можно сделать, если отсутствует существенная поправка на схему регенерации и режим работы подогревателя высокого давления). Если поправки на схему и режим п. в. д. значительны, пересчет следует вести по формуле:

$$p_2^{np} = A \frac{D_{ч.н.д.} + \Sigma \Delta D_{cx}}{D_{ч.н.д.}} p_2 = A \cdot B \cdot p_2,$$

где $D_{ч.н.д.}$ — расход пара через часть низкого давления (или через ступень перед отбором на п. н. д. № 1);

$\Sigma \Delta D_{cx}$ — алгебраическая сумма изменений расхода пара в отборы, учитывающих тепловую схему и режим п. в. д. в условиях опытов.

Нужно учитывать, что приведенная для пересчета мощности формула справедлива для условий, когда к. п. д. электрического генератора и механический к. п. д. остаются неизменными.

Если поправки к мощности значительны, пересчитывать на номинальные параметры следует внутреннюю мощность и затем учитывать механические потери и потери генератора¹.

Пересчет мощности с давления p_2^{np} на принятое за номинальное давление отработавшего пара p_2^n производится на основании экспериментальной кривой, полученной в результате обработки опытов с переменным вакуумом. Эта кривая учитывает все изменения к. п. д. последних ступеней при изменении условий их работы. Использование этой кривой исключает возможность какой-либо погрешности за счет приведения к номинальному давлению отработавшего пара.

Поправка на температуру свежего пара, как уже указывалось выше, вычисляется на основании данных ts -диаграммы.

При вычислении поправки температуре пара задается ряд произвольных значений. Давление свежего пара и давление отработавшего пара полагаются неизменными и равными номинальной величине. Внутренний к. п. д. можно принимать равным 0,8.

Изменение использованного теплового перепада в процентах к величине перепада, соответствующего текущему значению температуры, и является поправкой, служащей для пересчета мощности от условий опыта на номинальные условия.

При температуре в условиях опыта, повышающей номинальную, поправка имеет знак минус, при температуре ниже номинальной — знак плюс.

Для обратного пересчета от номинальных условий на отклоненные условия изменения теплового перепада относят к тепловому перепаду при номинальных значениях всех трех параметров и поправки имеют знаки обратные, указанным выше.

¹ При отсутствии необходимых данных, относящихся к испытываемому агрегату, следует пользоваться литературными источниками.

Эти поправки строятся в виде графиков. Однако в ряде случаев построение обоих видов поправок не оправдывается ввиду приближенности самого метода вычисления поправки и поэтому можно ограничиться построением только второго типа поправок.

Приведение к номинальной начальной температуре результатов испытания машин, в которых часть процесса расширения пара проходит в области влажного пара, следует производить с учетом влияния влажности на к. п. д. турбины.

Величина «приведенного» перепада вычисляется в соответствии со схемой процесса расширения (фиг. 21) по формуле:

$$h_i^{np} = h_i^{пер} + \frac{1+x_2}{2} h_i^{сн}.$$

Поправки к мощности на давление отработавшего пара определяются экспериментальным путем в результате обработки опытов при переменном вакууме. Принципиально методика обработки этих опытов не отличается от описанной выше, однако имеет ряд особенностей.

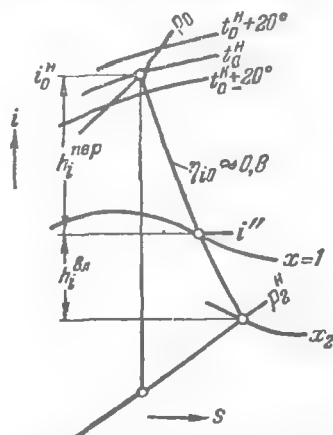
Методика обработки опытов с переменным вакуумом показана на примере обработки эксперимента, произведенного на машине типа АПТ-25 при закрепленном парораспределении (табл. 12). Обработка произведена в полном соответствии с методикой инж. А. С. Зильбермана (ЛМЗ).

Испытание произведено при незначительных отклонениях начального давления от номинальной величины ($\pm 2,5\%$), что позволяет полагать начальную температуру «фиктивного» процесса, равной фактической температуре в условиях опытов.

При проведении испытания расход пара не измерялся. Показателем расхода являлось давление в контрольной ступени, в качестве которой в данном случае выбрана камера второго регулируемого отбора. Давление в этой точке измерялось ртутным U-образным манометром. В условиях работы машины при закрепленных клапанах давление в контрольной ступени от температуры пара не зависит, меняясь лишь с изменением начального давления.

Поправка к мощности, учитывающая изменение расхода пара вследствие колебаний начального давления, выражается поэтому как:

$$ap_n = \frac{p_k^n - p_k}{p_k} 100\%;$$



Фиг. 21. Схема процесса в i - s -диаграмме при вычислении поправочных кривых на отклонение начальных параметров от номинальных.

Приведение результатов вакуумных опытов к номинальным условиям

Таблица 12

Поправка к мощности

Поправка к p_{κ}

$$\alpha_{p_{\kappa}} = \frac{p_{\kappa} - p_{\kappa}^H}{p_{\kappa}^H} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{p_2} = \frac{p_{\kappa} - p_{\kappa}^H}{p_{\kappa}^H} \cdot 100 - 2T_0^H (t_0^H - t_0)$$

$$p_{\kappa}^H = 1250 \text{ мм рт. ст.}$$

$$t_0^H = 400^\circ \text{C}$$

$$\delta H_0 = 0,135\%$$

$$\delta D_0 = \frac{D_0}{100} \approx 0,074\%$$

$$\alpha_{t_0} = 0,061 (t_0^H - t_0)$$

Обозначения	Размерность	№ опыта								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_{κ}	мм рт. ст.	1 239	1 265	1 256	1 227	1 235	1 272	1 278	1 260	1 285
$p_{\kappa} - p_{\kappa}^H$	мм рт. ст.	+11	-15	-6	+23	+15	-22	-28	-10	-35
$\alpha_{p_{\kappa}}$	%	+0,889	-1,186	-0,478	+1,875	+1,215	-1,729	-2,192	-0,794	-2,721
t_0	°C	398,8	392,2	399,6	400,3	405,8	405,6	402,8	403,3	402,4
$t_0^H - t_0$	°C	+1,2	+7,8	+0,4	-0,3	-5,8	-5,6	-2,8	-3,3	-2,4

ΔN_{np}	кгм	-1	-7	$\pm 0,0$	-110	-350	-501	-700	-1 525	-1 614
p_{np}^2	атм	0,0411	0,0434	0,0518	0,0602	0,0760	0,0817	0,0884	0,1223	0,1252
$\alpha_{p_2} \cdot p_2$	атм	+0,0003	-0,0008	-0,0003	+0,0011	+0,0012	-0,0011	-0,0018	-0,0007	-0,0033
α_{p_2}	%	+0,800	-1,763	-0,508	+1,897	+1,644	-1,315	-1,985	-0,550	-2,544
$0,074 (t_0^H - t_0)$	%	+0,089	+0,577	+0,030	-0,022	-0,429	-0,414	-0,207	-0,244	-0,177
p_2	атм	0,0408	0,0442	0,0521	0,0591	0,0748	0,0828	0,0902	0,1230	0,1285
$N_{np}^e = N_e + (\alpha_{t_0} + \alpha_{p_{\kappa}}) N_e$	кгм	24 443	24 437	24 444	24 334	24 094	23 943	23 744	22 919	22 830
$(\alpha_{t_0} + \alpha_{p_{\kappa}}) N_e$	кгм	+233	-173	-111	+444	+204	-507	-576	-231	-675
N_e	кгм	24 210	24 610	24 555	23 890	23 890	24 450	24 320	23 150	23 505
$\alpha_{t_0} + \alpha_{p_{\kappa}}$	%	+0,963	-0,702	-0,453	+1,856	+0,855	-2,076	-2,366	-0,998	-2,870
α_{t_0}	%	+0,074	+0,484	+0,025	-0,019	-0,360	-0,347	-0,174	-0,204	-0,149

здесь p_k^n — „номинальное“ давление в контрольной ступени (одинаковое для всей серии опытов при данном открытии клапанов); в качестве p_k^n обычно принимается величина, равная или близкая к среднему давлению в контрольной ступени из всех опытов серии;

p_k — давление в контрольной ступени в условиях опыта.

Отклонения начальной температуры влияют на мощность двояко: а) изменяя расход пара и б) изменяя тепловой перепад.

Очевидно, что обе поправки имеют разные знаки: повышение температуры уменьшает расход и увеличивает теплопадение и наоборот:

$$+\Delta t_0 \rightarrow \begin{cases} -\Delta D_0 \\ +\Delta H_0 \end{cases}$$

Новый расход при изменении начальной температуры на один градус будет:

$$D_0 + \delta D_0 = D_0 \sqrt{\frac{T_0 + 1}{T_0}}$$

и относительное изменение расхода:

$$\frac{\delta D_0}{D_0} = \sqrt{\frac{T_0 + 1}{T_0}} - 1.$$

Так как δD_0 весьма мало, можно принять:

$$\sqrt{\frac{T_0 + 1}{T_0}} \approx 1 + \frac{1}{2T_0} \text{ и тогда } \frac{\delta D_0}{D_0} \% = \frac{100}{2T_0} \%.$$

Соответствующее изменение (в $\frac{\%}{^\circ\text{C}}$) теплового перепада $\frac{\delta H_0}{H_0}$

определяется непосредственно из поправочной кривой на температуру. Общая поправка к мощности на температуру свежего пара будет:

$$\alpha_{t_0} = \left(\frac{\delta H_0}{H_0} - \frac{100}{2T_0} \right) (t_k^n - t_0).$$

Далее производится пересчет измеренного давления отработавшего пара.

По формуле

$$\alpha_{p_2} = \frac{p_k^n - p_k}{p_k} \cdot 100 - \frac{100}{2T_0} (t_0^n - t_0)$$

подсчитывается поправка, учитывающая отклонение расхода пара через ч. н. д. от величины, соответствующей при данном неизменном открытии парораспределительных клапанов номинальным начальным параметрам.

В качестве начальной температуры и давления свежего пара, к которым приводятся данные испытания при переменном вакууме, не обязательно принимать номинальные параметры машины.

Желательно выбрать такое давление и такую температуру пара, приведение к которым определяет минимальные величины поправок к измеренной мощности.

Совмещение серий опытов при разных расходах пара в одну «универсальную кривую» и построение на основании «универсальной кривой» сетки поправок на вакуум должно производиться в соответствии с указаниями статьи А. С. Зильбермана и Г. С. Смолярова в журнале «Теплосиловое хозяйство» № 7 за 1939 г.

Таким образом, приведение опытных данных к номинальным параметрам в соответствии с вышесказанным сводится к пересчету мощности на номинальное давление и температуру свежего пара по формуле:

$$N_s^{np} = A \cdot \beta_{10} \cdot N_s'$$

и введению дополнительной поправки к мощности ΔN на отклонение давления отработавшего пара «приведенного» процесса p_2^{np} от принятого за номинальное давление p_2^H по сетке поправок на вакуум.

Для лучшего уяснения порядка подсчетов при приведении к номинальным начальным и конечным параметрам пара в табл. 13 дается форма подсчета с числовым примером и необходимыми пояснениями.

В табл. 13 использованы данные приведения к нормальной тепловой схеме из табл. 11 и она завершает, таким образом, приведение результатов испытания конденсационного турбоагрегата к номинальным условиям. По этим приведенным данным может быть построена основная характеристика турбоагрегата — связь мощности, расхода пара и тепла.

В. Связь мощности, расхода пара и тепла

Результаты опыта, приведенные к номинальным условиям с внесением необходимых поправок на схему и режим работы п. в. д., дают отдельные точки зависимости мощности от расхода пара.

Линия зависимости $N_s^{np} = f(D_0^{np})$ должна проводиться после глубокого анализа положения всех точек на графике. При анализе следует в первую очередь учитывать возможное влияние характера работы: а) системы парораспределения; б) системы регенерации; в) последней ступени (давление отработавшего пара, принятое за номинальное, может оказаться равным предельному давлению при каком-то расходе пара; при этом расходе линия зависимости $D_0 = f(N_s)$ может иметь излом).

Когда линия проведена, по ней составляется уравнение характеристики $D_0 = f(N_s)$. По этому уравнению для характерных точек зависимости подсчитывается расход тепла

$$Q_0 = D_0(i_0^H - i_{нм}).$$

13 2400000

Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов	Способ определения
Давление свежего пара в условиях опытов	P_0	атм	30, 60	По результатам обработки первичных данных
Температура свежего пара в условиях опытов	t_0	°C	403, 2	По результатам обработки первичных данных
Темпосодержание свежего пара в условиях опытов	t_0	ккал/кг	772, 3	По результатам обработки первичных данных
Отклонение темпосодеержания от номинального	Δt_0	ккал/кг	-0, 9	По результатам обработки первичных данных
Отклонение температуры свежего пара от номинального	Δt_0	°C	-1, 6	По результатам обработки первичных данных
Фиктивная температура свежего пара	t_0^f	°C	401, 6	По результатам обработки первичных данных
Давление отработавшего пара в условиях опытов	P_2	атм	0, 0596	По результатам обработки первичных данных
Расход свежего пара, исключая эжектор	D_0	т/час	70, 1	По результатам обработки первичных данных
Расход в ч. н. д. в условиях опытов	$D_{ч.н.д.}$	т/час	66	По результатам обработки первичных данных
Суммарная поправка к расходу в ч. н. д. на схему	$\Sigma \Delta D_{сх}$	т/час	-5	По результатам обработки первичных данных
Расход в ч. н. д. с поправкой на схему	$D'_{ч.н.д.}$	т/час	61	По результатам обработки первичных данных

№	Наименование	Единица измерения	Значение	Формула
12	Мощность генератора в условиях опыта	тыс. квт	14,58	N_g
13	Суммарная поправка к мощности на схему	тыс. квт	-0,53	ΔN_{cx}
14	Мощность генератора с поправкой на схему	тыс. квт	14,05	N_g'
15	Отношение	—	0,948	$\frac{p_0}{p_H}$
16	—	—	1,002	$\sqrt{\frac{T_H}{T_0}}$
17	—	—	0,950	$\sqrt{\frac{p_H}{T_H} \cdot \frac{T_0}{p_0}}$
18	Поправочный коэффициент к мощности на отклонение фактивной начальной температуры от номинальной	—	0,998	β_0
19	$D_{н.д.} + \Delta D_{cx}$	—	0,92	B
20	Приведенный расход свежего пара без эжектора	м ³ /час	66,6	D_{np}^0
21	Мощность генератора при номинальных начальных параметрах с поправкой на схему	тыс. квт	13,32	N_{np}^g
22	Приведенное давление отработавшего пара	атм	0,0523	p_{np}^2
23	Поправка к мощности для приведения к номинальному давлению отработавшего пара	тыс. квт	+0,06	ΔN
24	Мощность генератора при номинальных условиях	тыс. квт	13,38	N_{np}^g

По результатам обработки первичных данных
из подсчета поправок (табл. 11)

$N_g' = N_g + \Delta N_{cx}$

—

—

—

$\beta_0 = 1 + \frac{\alpha_{t_0}}{100} \cdot \alpha_{t_0}$ — исходя из поправочной кривой на температуру $t_{ф}^0 \rightarrow t_H^0$

$D_{np}^0 = D_0 \cdot A$

$N_{np}^g = N_g \cdot A \beta_0$

$p_{np}^2 = A \cdot B \cdot p_2$

ΔN — по сетке поправок на вакуум $p_{np}^2 \rightarrow p_H^2$

$N_{np}^g = N_{np}^g + \Delta N$

Выражение для расхода тепла может быть и иным, если номинальный расход питательной воды не равен расходу свежего пара или тепловая схема имеет какие-либо особенности.

Величина теплоиспользования пара $i_0'' - i_{num}$ определяется как разность «номинального» (соответствующего номинальным начальным параметрам) теплосодержания свежего пара и теплосодержания питательной воды за последним подогревателем высокого давления. Теплосодержание питательной воды определяется по ее температуре и давлению в питательной магистрали. Температура питательной воды берется из графика $t_{num} = f(D_0)$, который строится по измеренным в условиях опыта величинам (без какого-либо пересчета).

По построенной линии зависимости расхода тепла от мощности составляется уравнение, характеризующее расход тепла.

2. Турбоагрегат с одним регулируемым отбором пара

Программа испытания турбины с регулируемым отбором предусматривает получение данных для характеристики конденсационного режима турбины с включенным регулятором давления (конденсационные опыты) и данных для характеристики ч. в. д. (опыты с отбором пара).

Приведение конденсационных опытов к нормальной схеме и к номинальным параметрам производится так же, как приведение опытов конденсационной турбины, описанное в пп. А и Б предыдущего раздела. Поэтому в этом разделе рассматривается только обработка опытов с отбором для получения приведенной к номинальным условиям характеристики ч. в. д.— зависимости внутренней мощности ч. в. д. от расхода свежего пара:

$$N_{i \text{ ч. в. д.}} = f(D_0).$$

Внутренняя мощность ч. в. д. в условиях опыта подсчитывается, исходя из расхода пара и использованного теплопотока, определенных по данным испытания.

Поскольку в большом числе конструкций турбин предусматривается нерегулируемый отбор на подогрев питательной воды (иногда два отбора), расход пара оказывается различным для отдельных групп ступеней ч. в. д. Поэтому внутренняя мощность ч. в. д. подсчитывается, как сумма мощности отдельных потоков пара

$$N_{i \text{ ч. в. д.}} = \frac{D_c h_i'' + D_n^I \cdot h_i^I}{860};$$

здесь D_c — «сквозной» поток пара через ч. в. д.;

D_n^I — расход пара в первом отборе на п. в. д.;

h_i'' — использованный перепад тепла ч. в. д. $h_i'' = i_0 - i_{2 \text{ ч. в. д.}}$;

h_i^I — использованное теплопадение для пара первого отбора

$$h_i^I = i_0 - i_n^I;$$

i_n^I — теплосодержание пара в камере первого отбора;

$i_{2 \text{ ч.в.д.}}$ — теплосодержание пара после ч. в. д.

Поскольку обычно отсос пара из промежуточной камеры переднего уплотнения производится в камеру регулируемого отбора или в отводящий патрубок регулируемого отбора, возможны два случая определения внутренней мощности ч. в. д. (см. также раздел IV, п. 4 первой части).

Первый случай: из данных испытания известна температура (теплосодержание) смеси пара, выходящего из ч. в. д., и отсоса пара из промежуточной камеры переднего уплотнения.

Второй случай: из данных испытания известна температура (теплосодержание) пара, выходящего из ч. в. д. (без подмешивания отсоса пара из уплотнения).

В первом случае в указанной выше формуле внутренней мощности расход пара «сквозного» потока равен:

$$D_c = D_0 - D_n^I,$$

а $i_{2 \text{ ч.в.д.}}$ соответствует теплосодержанию смеси пара из ч. в. д. и отсоса из переднего уплотнения. •

Во втором случае подсчет внутренней мощности ч. в. д. ведется по этой же формуле, однако сквозной поток пара через ч. в. д. принимается равным:

$$D_c = D_0 - D_{отс} - D_n^I,$$

где $D_{отс}$ — протечка пара через переднее уплотнение ч. в. д., а $i_{2 \text{ ч.в.д.}}$ соответствует теплосодержанию пара, выходящего из ч. в. д. (без искажения за счет подвода пара из переднего уплотнения).

Расход пара из переднего уплотнения $D_{отс}$ может быть определен или непосредственным измерением или расчетом, исходя из конструкции уплотнения и величины зазоров (см., например, И. И. Кириллов и С. А. Кантор, Теория и конструкции паровых турбин, стр. 145, Машгиз, 1947).

Полученные в результате обработки опытных данных значения внутренней мощности ч. в. д. должны быть пересчитаны на номинальные условия для получения приведенной характеристики ч. в. д.

А. Приведение результатов испытания к нормальной тепловой схеме

К внутренней мощности ч. в. д. поправка вводится лишь на несоответствие режима п. в. д. в условиях опытов номинальным условиям.

№ п/п	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов		Способ определения
				2	7	

1	Расход свежего пара в условиях опытов (включая эжектор)	$\bar{D}_0$	м ³ /час	149,3		По результатам обработки первичных данных
2	Расход пара на эжектор	$D_{эж}$	м ³ /час	1,00		По результатам обработки первичных данных
3	Расход свежего пара (исключая эжектор)	D_0	м ³ /час	148,3		По результатам обработки первичных данных
4	Теплосодержание питательной воды после п. в. д.	$t_{пнт}$	ккал/кг	149,9		Соответственно $t_{пнт}$ и $P_{пнт}$ по измерению
5	Номинальное теплосодержание питательной воды перед п. в. д.	$t'_{пнт}$	ккал/кг	103,1		Соответственно принятой $t'_{пнт}$ и $P_{пнт}$ по измерению
6	Номинальное повышение теплосодержания питательной воды в п. в. д.	$\Delta t'_{пнт}$	ккал/кг	46,8		$\Delta t'_{пнт} = t_{пнт} - t'_{пнт}$
7	Теплоиспользование пара первого отбора в п. в. д.	$\Delta t'_n$	ккал/кг	550,6		По результатам обработки первичных данных
8	Расход пара на п. в. д. номинальный	D'_n	м ³ /час	12,7		$D'_n = \frac{D_0(t'_{пнт} - t'_{пнт3})}{t'_n - t'_{пнт3}}$

9	То же в условиях опытов	D'_n	м ³ /час	14,60		По результатам обработки первичных данных
10	"Сквозной" расход пара через ч. в. д., номинальный	D'_c	м ³ /час	135,6		$D'_c = D_0 - D'_n$
11	То же в условиях опытов	D_c	м ³ /час	133,7		$D_c = D_0 - D'_n$
12	Использованный перепад тепла до первого отбора	h'_1	ккал/кг	65,9		По результатам обработки первичных данных
13	Внутренняя мощность пара первого отбора при номинальном расходе на п. в. д.	N'_n	тыс. квт	0,973		$N'_n = \frac{D'_n \cdot h'_1}{860}$
14	Использованный перепад тепла ч. в. д.	h'_n	ккал/кг	126,7		По результатам обработки первичных данных
15	Внутренняя мощность "сквозного" потока при номинальном отборе на п. в. д.	N'_c	тыс. квт	19,977		$N'_c = \frac{D'_c \cdot h'_n}{860}$
16	Внутренняя мощность ч. в. д. при номинальном отборе на п. в. д.	$N'_{ч.д.}$	тыс. квт	20,950		$N'_{ч.д.} = N'_c + N'_n$

При изменении расхода пара в первый отбор давление в этом отборе обычно полагается постоянным; равным образом полагается неизменным и внутренний к. п. д. всего лопаточного аппарата ч. в. д. Это дает возможность учесть отличие фактического отбора на п. в. д. от соответствующего номинальным условиям его работы непосредственно при вычислении внутренней мощности ч. в. д.

В табл. 14 на примере показан такой подсчет для случая, когда из испытания известно теплосодержание смеси пара после ч. в. д. и отсоса из переднего уплотнения.

Б. Приведение результатов испытания к номинальным начальным и конечным параметрам пара

Пересчет внутренней мощности ч. в. д. для получения приведенной характеристики ч. в. д. ведется по подобной же формуле, как и для конденсационных опытов:

$$N_{i\text{ ч.в.д.}}^{np} = A_{i0}^2 \cdot N_{i\text{ ч.в.д.}}' + \Delta N,$$

где $N_{i\text{ ч.в.д.}}'$ — внутренняя мощность ч. в. д. при параметрах опыта с поправкой на режим п. в. д.;

$$A = \frac{D_0^{np}}{D_0} = \frac{p_0''}{p_0} \sqrt{\frac{T_0}{T_n''}} \text{ — коэффициент;}$$

$$\beta_{t_0} = \left(1 - \frac{\alpha_{t_0}}{100}\right) \text{ — коэффициент;}$$

ΔN — поправка к внутренней мощности на отличие соответствующего „приведенному“ процессу давления в регулируемом отборе p_n^{llnp} от номинального (или принятого за номинальное) p_n^{ll} .

Поправка α_{t_0} на отклонение температуры пара „фиктивного“ процесса от номинальной температуры t_0'' определяется по *is*-диаграмме из соотношения перепада тепла, как указано в п. 1 Б этого раздела, от начальных параметров до номинального давления в регулируемом отборе.

Конечное давление „приведенного“ процесса, соответствующее номинальным параметрам свежего пара и расходу пара D_0^{np} , определяется как:

$$p_n^{llnp} = A p_n^{ll},$$

если поправка на режим п. в. д. незначительна.

В противном случае при определении p_n^{llnp} следует учитывать изменение „сквозного“ потока пара через ч. в. д. и тогда

$$p_n^{llnp} = A \cdot B p_n^{ll},$$

где $B = \frac{D_c''}{D_c}$.

Поправка к внутренней мощности на отличие давления в регулируемом отборе, соответствующего «приведенному» процессу $p_n^{\text{II пр}}$ от номинального давления $p_n^{\text{II н}}$, определяется или экспериментальным путем, или расчетом.

Очевидно, что наиболее достоверным является использование поправок, полученных непосредственно из испытания. В этом случае поправку удобно представить в виде сетки подобно тому, как изображается поправка для учета влияния переменного давления в конденсаторе (см. часть вторую, раздел II, п. 1,Б).

Программа опытов и методика обработки их подобны указанному в соответствующих разделах книги для определения поправки на давление отработавшего пара. Разница состоит лишь в том, что в данном случае мощность не измеряется, а подсчитывается по параметрам пара в начале и конце теплового процесса ч. в. д.

Таблица 15

Подсчет поправки на давление в регулируемом отборе

$p_0 = 29 \text{ атм}$; $t_0 = 400^\circ \text{C}$; $p_n^{\text{II}} = 1,2 \div 2,0 \text{ атм}$; $\eta_{i0} = 0,8$.

Давление в регулируемом отборе	Обозначение	Размерность	1,2	1,5	1,8	2,0
Наименование						
1. Начальное тепло- содержание при номи- нальных параметрах	$i_0^{\text{н}}$	ккал/кг	771,4			
2. Теплосодержание в конце адиабатического расширения	$i_{2\text{ч. в. д.}}^0$	ккал/кг	608,0	616,7	624,0	628,2
3. Располагаемый пе- репад тепла	$h_{0\text{ч. в. д.}}$	ккал/кг	163,4	154,7	147,4	143,2
Изменение перепа- да тепла						
4. Располагаемого	$\Delta h_{0\text{ч. в. д.}}$	ккал/кг	0	8,7	16,0	20,2
5. Использованного	$0,8 \Delta h_{0\text{ч. в. д.}}$	ккал/кг	0	6,95	12,80	16,16
6. Удельное сниже- ние мощности	$0,8 \Delta h_{0\text{ч. в. д.}}$	квт/т	0	8,08	14,88	18,80
	0,86					
Снижение мощности при расходе пара						
7. 80 т/час	—	тыс. квт	0	0,65	1,19	1,50
8. 100 т/час	—	тыс. квт	0	0,81	1,49	1,88
9. 120 т/час	—	тыс. квт	0	0,97	1,79	2,26
10. 140 т/час	—	тыс. квт	0	1,13	2,08	2,63

Если опытные данные отсутствуют, то поправочная кривая подсчитывается с использованием данных *is*-диаграммы.

Подсчет такой поправочной кривой для турбины типа АТ показан на примере в форме табл. 15.

Величина снижения мощности подсчитывается по данным п. 6 как произведение удельного снижения мощности на расход пара. Последний задается через желаемые интервалы в необходимом диапазоне изменения его.

Возможна и другая форма графика: в зависимости от давления в регулируемом отборе наносятся величины удельного снижения мощности. Тогда искомая поправка определяется как произведение приведенного «сквозного» расхода на удельное снижение мощности, найденное по графику соответственно величине приведенного давления в регулируемом отборе $p_n^{нпр}$.

Подобная поправочная кривая (или сетка поправок) является приближенной, так как, во-первых, внутренний к. п. д., принимаемый равным 0,8, более или менее отличается от истинного и, во-вторых, этот к. п. д. принят независимым от давления в отборе, что также неточно.

Для того чтобы по возможности уменьшить погрешность при введении поправки на давление регулируемого отбора, следует при испытании поддерживать давление в регулируемом отборе возможно более близким к номинальному.

Если опыты проводятся при отличном от номинального давлении свежего пара, давление в регулируемом отборе следует изменить так, чтобы было сохранено равенство:

$$\frac{p_n^{н}}{p_0^{н}} = \frac{p_n}{p_0}.$$

В табл. 16 дана форма и пример пересчета мощности и расхода пара через ч. в. д. на номинальные параметры свежего пара и введения поправки на давление в регулируемом отборе.

Обработанные таким образом опыты с регулируемым отбором, нанесенные на график, дают характеристику ч. в. д. турбины $N_{ч.в.д.}^{нпр} = f(D_0^{нпр})$. При проведении линии характеристики по точкам следует учитывать влияние на протекание этой зависимости системы парораспределения и режима работы п. в. д.

В. Связь мощности, расхода свежего пара и расхода в отбор

Мощность турбины с регулируемым отбором складывается из мощности, развиваемой потоком пара, проходящим в конденсатор (конденсационный расход), и мощности, развиваемой потоком пара, идущим в отбор. Эта последняя слагающая мощности определяется по характеристике ч. в. д. как прирост внутренней мощности при изменении расхода пара от величины «конденсацион-

ного расхода» до полного расхода свежего пара при режиме с заданным регулируемым отбором.

Особенности конструкции машины (повышение давления в регулируемом отборе при некоторых режимах) и наличие схемы регенерации могут внести в форму вычисления диаграммы те или иные изменения, не меняя, однако, существа метода.

Если взять в качестве примера конденсационный турбоагрегат без регенерации с неизменным давлением в регулируемом отборе при всех режимах, вычисление диаграммы режимов следует вести в соответствии с уравнениями:

Расход свежего пара $D_0^o = D_0^k + D_n$ соответствует мощности

$$N_g^o = N_g^k + \Delta N_{ч.в.д.},$$

где

$$\Delta N_{ч.в.д.} = \left[\frac{D_0^o h_0 \eta_{io}^o}{860} - \frac{D_0^k h_0 \eta_{io}^k}{860} \right] \eta'_{г2};$$

здесь D_0^o — расход свежего пара при режиме с регулируемым отбором D_n и при расходе в ч. н. д. — „конденсационном расходе“ D_0^k ;

N_g^o — мощность генератора при режиме с регулируемым отбором D_n при „конденсационном расходе“ D_0^k ;

N_g^k — мощность при заданном „конденсационном расходе“ D_0^k , определяемая по экспериментальной характеристике конденсационного режима при включенном регуляторе давления (или по характеристическому уравнению для этого режима);

$\Delta N_{ч.в.д.}$ — прирост мощности ч. в. д. в результате увеличения расхода свежего пара от D_0^k до D_0^o , отнесенный к зажимам генератора;

η_{io}^o и η_{io}^k — внутренний относительный к. п. д. ч. в. д., соответственно с регулируемым отбором D_n и без него, при неизменном „конденсационном расходе“ D_0^k ;

h_0 — располагаемое теплопадение ч. в. д.;

$\eta'_{г2}$ — „частный“ к. п. д. генератора, учитывающий лишь его переменные потери; постоянные потери генератора и турбины учтены в величине мощности N_g^k , взятой по экспериментальной характеристике конденсационного режима.

По условию $D_0^o = D_0^k + D_n$.

Тогда, после преобразования:

$$N_g^o = N_g^k + \left[\frac{D_n h_0 \eta_{io}^o}{860} + \frac{D_0^k h_0 (\eta_{io}^o - \eta_{io}^k)}{860} \right] \eta'_{г2}.$$

Приведение расхода пара и мощности ч. в. д. к номинальным условиям
 $p_n^0 = 29 \text{ атм}$, $t_n^0 = 400^\circ \text{С}$, $i_n^0 = 771,4 \text{ ккал/кг}$, $p_{II}^n = 1,2 \text{ атм}$

Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов		Способ определения
			2	7	

1. Давление свежего пара в условиях опытов	p_0	атм	29,26	403,1	По результатам обработки первичных данных
2. Температура свежего пара в условиях опытов	t_0	°С	403,1	772,9	По результатам обработки первичных данных
3. Температуродержание свежего пара в условиях опытов	i_0	ккал/кг	772,9	—1,5	По результатам обработки первичных данных
4. Отклонение температуродержания от номинального	Δi_0	ккал/кг	—1,5	—2,7	$\Delta i_0 = i_{n1}^0 - i_0$
5. Отличие температуры фиктивного процесса от номинальной температуры свежего пара	Δt_0	°С	—2,7	402,7	$\Delta t_0 = \frac{c_n^0}{c_n^0} : c_n^0 \gg p_n^0$ и t_n^0
6. Фиктивная температура свежего пара	t_ϕ^0	°С	402,7	1,35	По результатам обработки первичных данных
7. Давление пара за ч. в. д. в условиях опыта	p_{II}^n	атм	1,35	148,3	По результатам обработки первичных данных
8. Расход свежего пара, исключая эжектор	D_0	м³/час	148,3	20,95	Из табл. 14
9. Внутренняя мощность ч. в. д. при номинальном отборе на п. в. д.	$N_{в.д.}^n$	тыс. кат	20,95	—	—

№

10. $\frac{p_0}{p_n}$	—	—	0,991	—	—
11. $\sqrt{\frac{T_\phi^0}{T_n^0}}$	—	—	1,002	—	—
12. $\frac{p_0}{p_n} \cdot \sqrt{\frac{T_\phi^0}{T_n^0}}$	A	—	0,993	—	—
13. Поправочный коэффициент к мощности на от- личие фиктивной температуры от номиналь- ной	β_0	—	0,996	—	По данным табл. 14
14. $\frac{D_c}{D}$	B	—	1,014	—	По данным табл. 14
15. Приведенный расход свежего пара	$D_{пр}^0$	м³/час	147,3	20,72	$D_{пр}^0 = AD_0$
16. Приведенная внутренняя мощность ч. в. д. при номинальном отборе на п. в. д.	$N_{в.д.}^{пр}$	тыс. кат	20,72	1,34	$N_{в.д.}^{пр} = A\beta_{10} \cdot N_{в.д.}^n$
17. Приведенное давление за ч. в. д.	$p_{II}^{пр}$	атм	1,34	+0,33	$p_{II}^{пр} = A \cdot B \cdot p_{II}^n$
18. Поправка к внутренней мощности ч. в. д. для приведения к номинальному давлению в регулируемом отборе	ΔN	тыс. кат	+0,33	21,05	По расчетной или экспериментальной сетке поправок $p_{II}^{пр} \rightarrow p_{II}^n$
19. Внутренняя мощность ч. в. д. при номиналь- ных условиях	$N_{в.д.}^{пр}$	тыс. кат	21,05	—	$N_{в.д.}^{пр} = N_{в.д.}^{пр} + \Delta N$

Написанное в таком виде уравнение ясно показывает, что прирост мощности ч. в. д., так называемая теплофикационная выработка, есть алгебраическая сумма двух величин:

1) мощности, развиваемой потоком отборного пара:

$$\left(\frac{D_n h_{0'io}^o}{860} \right) \eta'_{sz};$$

2) разности мощности, развиваемой «конденсационным расходом», проходящим через ч. в. д. при режиме с отбором и при конденсационном режиме:

$$\left[\frac{D_0^k h_0 (\eta_{io}^o - \eta_{io}^k)}{860} \right] \eta'_{sz};$$

т. е. изменения мощности «конденсационного расхода» за счет изменения внутреннего к. п. д. при этих режимах. Поэтому, хотя в основу диаграммы режимов положена характеристика конденсационного режима, изменение мощности «конденсационного расхода» в ч. в. д. при режиме с отбором (изменение к. п. д. ч. в. д.) учитывается характеристикой ч. в. д., по которой вычисляется прирост мощности за счет отбора.

Известную погрешность в вычисленную таким способом диаграмму вносит следующее обстоятельство: при неизменном «конденсационном расходе» и различном отборе теплосодержание пара перед ч. н. д. будет изменяться в зависимости от внутреннего к. п. д. ч. в. д. Это определяет различную мощность ч. н. д. при неизменном расходе через нее пара. Но анализ величины возникающей погрешности показывает, что она не может внести в диаграмму режимов существенной дополнительной ошибки.

При вычислении диаграммы режимов для машины с регенерацией нужно учитывать, что при неизменном «конденсационном расходе» и меняющемся регулируемом отборе изменение расхода свежего пара не равно изменению расхода пара регулируемого отбора. Это несоответствие определяется изменением потребления пара для регенеративного подогрева конденсата и питательной воды.

Ниже приводится пример подсчета диаграммы режимов для турбоагрегата типа АПТ-25 при условии использования первого регулируемого отбора лишь для регенеративного подогрева питательной воды в п. в. д.

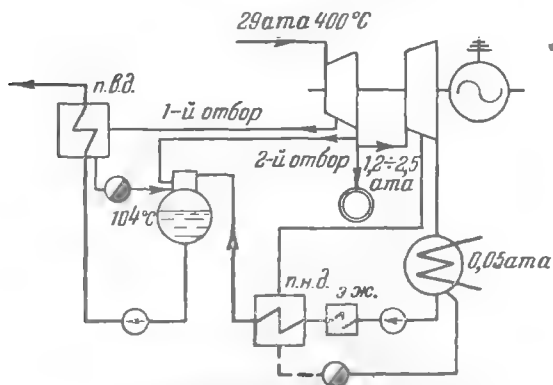
Следует предварительно заметить, что для данного конкретного случая при «конденсационном расходе» более 92,5 т/час давление в камере второго отбора при установке регулятора давления на 1,2 ата становится нерегулируемым и возрастает пропорционально расходу пара. Рост давления снижает мощность ч. в. д., что должно учитываться соответствующей поправкой, так как мощность по характеристике ч. в. д. на всем диапазоне изменения расхода соответствует давлению во втором отборе 1,2 ата.

Для приведенной тепловой схемы (фиг. 22) имеем следующее выражение для расхода пара:

$$D_0^o = D_0^k + D_n + \Delta(D_n^i - \Delta D_n^o)$$

и, соответственно, мощности:

$$N_g^o = N_g^k + (\Delta N_{i \text{ ч.в.д.}} - \Delta N) \eta_{g2}';$$



Фиг. 22. Принципиальная тепловая схема турбогенератора типа АПТ-25.

здесь ΔD_n^i — изменение отбора на подогреватель высокого давления при изменении расхода свежего пара (питательной воды) от D_0^k до D_0^o при $D_0^k = \text{пост.}$;

ΔD_n^o — изменение расхода греющего пара деаэратора за счет изменения количества выпара из дренажа п. в. д. в деаэраторе (при изменении расхода свежего пара и питательной воды от D_0^k до D_0^o при $D_0^k = \text{пост.}$), это изменение количества выпара меняет потребление пара второго отбора для подогрева конденсата в деаэраторе;

$\Delta N_{i \text{ ч.в.д.}}$ — прирост внутренней мощности ч. в. д. при изменении расхода свежего пара от D_0^k до D_0^o , определяемой по характеристике ч. в. д.;

ΔN — потеря мощности ч. в. д. при увеличении давления в регулируемом отборе сверх номинального (1,2 атм).

Для вычисления диаграммы режимов в данном случае требуется:

1. Характеристика конденсационного режима при включенном регуляторе давления (в данном случае были включены оба регулятора давления), включенной регенерации и номинальных параметрах.

2. Характеристика ч. в. д. при номинальных параметрах и включенной регенерации.

3. Зависимость давления в регулируемом отборе от «конденсационного расхода» пара.

4. Зависимость расхода в отбор на п. в. д. и изменения потребления греющего пара деаэратором от расхода свежего пара.

5. Поправочная кривая к мощности ч. в. д. на отклонение давления в регулируемом отборе от номинального.

Первые три характеристики известны из обработки данных испытания.

Зависимость расхода пара в отбор на п. в. д. и изменения потребления греющего пара деаэратора от расхода свежего пара вычисляется следующим образом:

1. Строится график зависимости расхода пара в отбор на подогреватель высокого давления от расхода свежего пара при номинальных условиях работы подогревателя. Для этого используются данные подсчетов поправки к мощности на отличие режима п. в. д. в условиях опытов от номинального (табл. 14).

2. Соответственно расходу свежего пара 20, 40, 60, 80 и 100% от максимального при испытании определяется (по графику) расход пара первого отбора. Затем для выбранных значений расхода на п. в. д. подсчитывается уменьшение расхода греющего пара деаэратора за счет тепла выпара дренажа п. в. д. в деаэраторе (при условии постоянства «конденсационного расхода» пара, т. е. расхода и температуры конденсата отработавшего пара, поступающего в деаэратор):

$$\Delta D_n^a = \frac{D_n^1 (i_{кнз} - i_{кд}^n)}{i_n^{II} - i_{кд}^n}.$$

Величина ΔD_n^a наносится на график, на который затем наносится кривая

$$(D_n^1 - \Delta D_n^a) = f(D_0).$$

Эта последняя зависимость и является искомой.

Поправочная кривая к мощности ч. в. д. получается экспериментальным путем, либо расчетом по Is -диаграмме, как указывалось выше в п. 2,Б настоящего раздела.

Поправка на давление в камере регулируемого отбора вычисляется различно в зависимости от типа парораспределения.

Дроссельное парораспределение ч. н. д. Если диаграмма режимов строится для номинального давления, для которого построена характеристика конденсационного режима при включенном регуляторе давления, то поправка относится не ко всей мощности ч. в. д., а лишь к приросту мощности ч. в. д. за счет отбора и вводится для режимов, где давление в отборе становится нерегулируемым. При подсчете диаграммы режимов на повышенное против номинального давление поправка относится к полной мощности ч. в. д. для режимов, при которых возможно регулирование давления (при установке регулятора на повышенное давление).

В зоне нерегулируемого давления поправка относится к приросту мощности ч. в. д.

Сопловое парораспределение ч. н. д. При сопловом парораспределении ч. н. д. и отличии давления от номинального поправка относится лишь к приросту мощности ч. в. д.

Мощность «конденсационного расхода» при изменении давления в отборе меняется лишь за счет различия к. п. д. последней ступени ч. в. д. и первой ступени ч. н. д.

Практически это различие трудно оценить, но, поскольку оно не может быть большим, перераспределяемый перепад также в большинстве случаев незначителен. Поэтому характеристику конденсационного режима при сопловом парораспределении принято считать не зависящей от давления регулируемого отбора. Все это, разумеется, допустимо при изменении давления в относительно небольших пределах.

Численный пример подсчета диаграммы режимов для расхода пара в отбор 50 т/час на основе заданных характеристик.

Исходные характеристики определяются уравнениями:
Характеристика конденсационного режима

$$D_0^k = 29,6 + 3,80N_s + 0,393; (N_s - 16,55);$$

$$D_0^{pk} = 92,5 \text{ т/час.}$$

Перелом характеристики конденсационного режима при расходе пара $D_0^{pk} = 92,5 \text{ т/час}$ определяется началом повышения давления в камере регулируемого отбора сверх номинального (остающегося при меньших расходах постоянным).

Характеристика ч. в. д. (величина удельного прироста внутренней мощности)

Расход свежего пара . .	т/час	40—70	70—130	130—136,8	136,8—160
Удельный прирост . .	квтч'т	159	198	153	115
Давление в регулируемых отборах . .	ата	—	—	7,0 и	1,2

Зависимость давления в регулируемом отборе от «конденсационного расхода»

$$p_n^{\text{II}} = 0,013 \cdot D_0^k (D_0^k - \text{т/час}; p_n^{\text{II}} - \text{ата}).$$

При значении $D_0^k < 92,5 \text{ т/час}$ $p_n^{\text{II}} = 1,2 \text{ ата.}$

$$p_0 = 29 \text{ атм}; \quad t_0 = 400^\circ \text{ С}; \quad i_0 = 771,4 \text{ ккал/кг}; \quad p_2 = 0,05 \text{ атм};$$

D_0^K	D_n^{II}	$D_0^K + D_n^{II}$	$\Delta (D_n^I - \Delta D_n^D)$	D_0^D	$\Delta N_{\text{ч.в.д.}}$
т/час	т/час	т/час	т/час	т/час	тыс. кВт
40	50	90	8,0'3,1—4,9	94,9	9,70
60		110	9,8'4,3—5,5	115,5	10,60
80		130	11,7'5,9—5,8	135,8	10,79
92,5		142,5	12,9'6,9—6,0	148,5	9,82
100		150	13,6'7,5—6,1	156,1	9,21
Принимается: минимум, по минимальному расходу характеристики ч. в. д.; максимум, ориентируясь на номинальную мощность и максимально допустимый «конденсационный расход»		Принимается	Последовательным приближением по графику $(D_n^I - \Delta D_n^D) = f(D_0)$ соответственно $D_0^K + D_n^{II} + \sim (D_n^I - \Delta D_n^D)$ (числитель) и $D_0^K \sim (D_n^I - \Delta D_n^D)$ (знаменатель)		По характеристике ч. в. д., соответственно D_0^D и D_0^K $D_0^D = D_0^K + D_n^{II} + \sim (D_n^I - \Delta D_n^D)$

Зависимость $(D_n^I - \Delta D_n^D) = f(D_0)$ выражается уравнением

$$(D_n^I - \Delta D_n^D) = (D_0 - 5,5) 0,086 \text{ т/час.}$$

Поправочная кривая к внутренней мощности ч. в. д. применяется построенная на основании данных *Is*-диаграммы.

При всех расчетах удобнее пользоваться построенными в соответствующем масштабе графиками, чем математическими связями.

В табл. 17 показана рациональная форма подсчета и подсчет отдельных точек диаграммы режимов.

III. РАБОТА ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ДАВЛЕНИЕ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СТУПЕНЯХ ТУРБИНЫ

При неизменном открытии клапанов давление в промежуточной ступени определяется начальным давлением. Изменение начальной температуры влияет на расход пара, но на промежуточное давление влияния не оказывает.

Поэтому при построении зависимости давления в промежуточных ступенях (а также за клапанами) от приведенного рас-

Таблица 17

граммы режимов

 $i_{\text{пат}} = 156 \text{ ккал/кг}; \quad \Delta i = 615,4 \text{ ккал/кг}; \quad p_n^I = 7,0 = \text{пост.}; \quad p_n^{II} = 1,2 \text{ атм}$

Π p_n	ΔN	$\Delta N_{\text{т.с.д.}} - \Delta N$	ΔN_{θ}^0	N_{θ}^{κ}	$\Delta N_{\theta}^0 = N_{\theta}^{\kappa} + \Delta N_{\theta}^0$	Q_0
атм	тыс. квт	тыс. квт	тыс. квт	тыс. квт	тыс. квт	мгкал/час
1,20	0	9,70	9,51	2,74 ^a	12,25	58,4
1,20	0	10,60	10,39	8,00	18,39	71,1
1,20	0	10,79	10,59	13,25	23,84	83,6
1,20	0	9,82	9,63	16,55	26,18	91,4
1,29	-0,18	9,03	8,85	18,32	27,19	96,1
По экспериментальной кривой, соответствующено D_0^{κ}	По экспериментальной или расчетной поправочной кривой, соответственно D_n^{II} и p_n^{II}		$\Delta N_{\theta}^0 = (\Delta N_{\text{т.с.д.}} - \Delta N) \eta_{\theta z}$	α — удельная выработка при конденсационном режиме $N_{\theta}^{\kappa} = (D_0^{\kappa} - D_{x,x}) \alpha$		$Q_0 = D_0^0 (i_0 - i_{\text{пат}})$

хода пара измеренное давление должно быть пересчитано в отношении номинального начального давления к давлению в условиях опыта

$$p^{np} = p \frac{p_0^{\kappa}}{p_0}$$

При анализе зависимости $p^{np} = f(D_0^{np})$ необходимо учитывать возможное искажение ее вследствие:

а) несоответствия режима регенеративной схемы требующемуся («номинальному») режиму и

б) отклонения давления в регулируемом отборе от номинального (в случае близости данной ступени к камере регулируемого отбора).

Соответствующей поправкой эти искажения могут быть легко скорректированы:

а) Давление в любой точке прочной части определяется при прочих равных условиях расходом пара через ступень, перед которой измеряется давление. Если в результате пересчета, связанного с изменением схемы или режима работы схемы при ис-

пытании, расход через эту последующую ступень будет иным, то давление изменится пропорционально расходу:

$$p^{np} = p \frac{D + \Sigma \Delta D_{cx}}{D}. \quad \vee$$

Следовательно, приведенному к номинальным начальным параметрам расходу пара отвечает приведенное давление в ступени:

$$p^{np} = \frac{p_0^n}{p_0} \left(\frac{D + \Sigma \Delta D_{cx}}{D} \right) p = K \cdot p.$$

Пример. Если в условиях опыта давление перед ч. н. д. было 1,00 *ата* при расходе в ч. н. д. 66 *т/час*, а после введения поправки расход в ч. н. д. составил 61 *т/час*, то приведенное давление, соответствующее расходу пара 61 *т/час*, будет:

$$p_{ч.н.д.}^{np} = \frac{29,0 \cdot 61}{30,6 \cdot 66} \cdot 1,00 = 0,88 \text{ ата}$$

(условия опыта из табл. 13).

б) Если при давлении в камере регулируемого отбора p'_n , отличном от номинального, измерено давление p_n в ступени, предшествующей регулируемому отбору, то приведенное давление p_n^{np} при номинальном давлении в регулируемом отборе $p_n'^n$ определится как:

$$p_n^{np} = \sqrt{(K p_n)^2 - (K p_n')^2 + (p_n')^2},^*$$

где

$$K = \frac{p_0^n}{p_0} \frac{D + \Sigma \Delta D_{cx}}{D}.$$

Коэффициент K подсчитывается для ступени, последующей за точкой, где измерено давление p_n .

Следует иметь в виду, что даже при номинальном давлении в регулируемом отборе (в условиях опытов), но при значительной величине коэффициента K измеренное давление в ступени должно корректироваться по вышеприведенной формуле.

IV. ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Работа вспомогательного оборудования — конденсатора и регенеративных подогревателей, являющихся теплообменными аппаратами, — характеризуется величиной температурного напора (разностью температуры насыщения пара и выходящей воды).

Величина температурного напора при прочих равных усло-

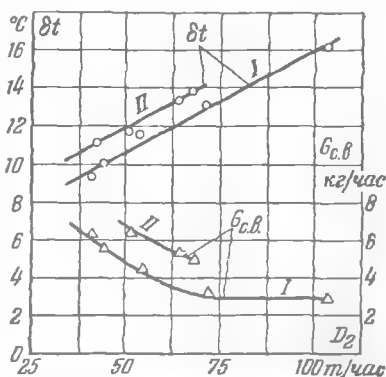
* Если отношение давлений для ступеней, находящихся между точками измерения давлений, больше критического.

виях существенно зависит от неконденсирующихся газов, всегда находящихся в некотором количестве в паровом пространстве теплообменного аппарата и ухудшающих процесс теплообмена тем сильнее, чем больше абсолютное количество этих газов и ниже давление в паровом пространстве. От присутствия неконденсирующихся газов особенно сильно зависит теплообмен в конденсаторе. Поэтому характеристику работы конденсатора — зависимость температурного напора от удельной паровой нагрузки — следует дополнять кривой, показывающей изменение плотности вакуумной системы при изменении паровой нагрузки конденсатора.

Эта кривая строится по данным измерения расхода газов на выпускной трубке холодильника последней ступени эжектора. Наиболее просто измерение с помощью нормальной дроссельной диафрагмы (если нет специального прибора), организуемое в соответствии с обычными требованиями для такого рода измерений с применением водяного дифференциального манометра. Образец такого рода характеристики конденсатора приведен на фиг. 23.

В отдельных случаях представляют интерес гидравлические характеристики теплообменных аппаратов — падение давления в зависимости от расхода воды, а также сопротивление паропроводов отбираемого пара от турбины до подогревателя. Эти характеристики могут быть надежно построены лишь при условии определения перепада давления с помощью дифференциального манометра. Здесь даны лишь общие указания, касающиеся теплообменных аппаратов вспомогательного оборудования.

Для более подробного ознакомления с вопросом исследования работы вспомогательного оборудования следует обратиться к специальной литературе.



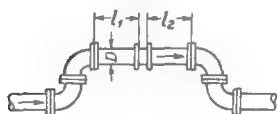
Фиг. 23. Температурный напор Δt и присос воздуха $G_{c.p.}$ в зависимости от расхода пара в конденсаторе.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

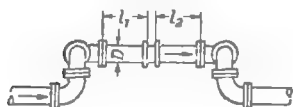
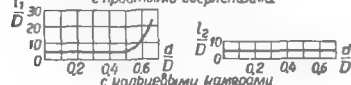
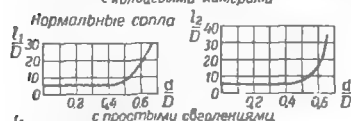
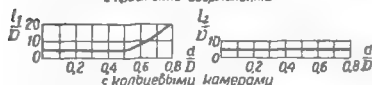
1. А. В. Щегляев, Н. Г. Морозов, Испытание паровых турбин, ОНТИ НКТП СССР, 1937.
2. А. С. Зильберман, Г. С. Смоляров, Влияние вакуума в конденсаторе на экономичность паровой турбины, „Теплосиловое хозяйство“, 1939, № 7.
3. А. Цинцен, Влияние температуры пара на коэффициент полезного действия турбины, ГЭИ, 1932.

ПРИЛОЖЕНИЕ

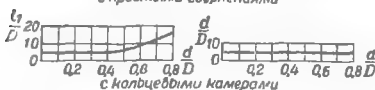
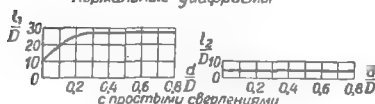
Графики и таблицы для организации измерения и подсчета расхода пара и воды с помощью нормальных сопел и диафрагм.



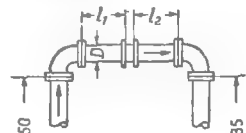
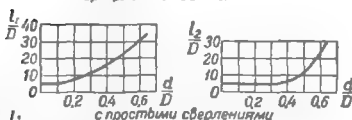
Нормальные диафрагмы



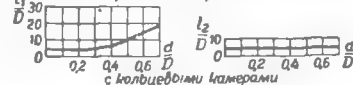
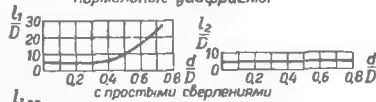
Нормальные диафрагмы



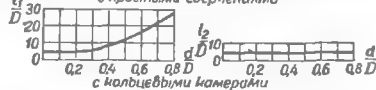
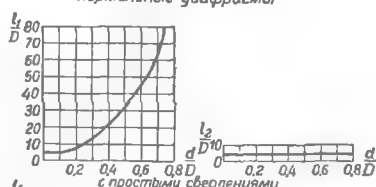
Нормальные сопла



Нормальные диафрагмы



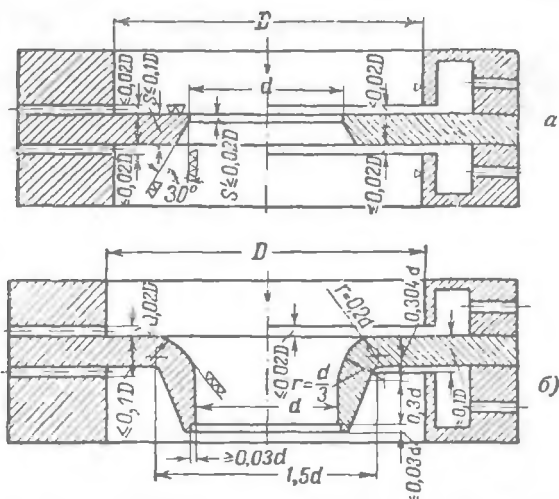
Нормальные диафрагмы



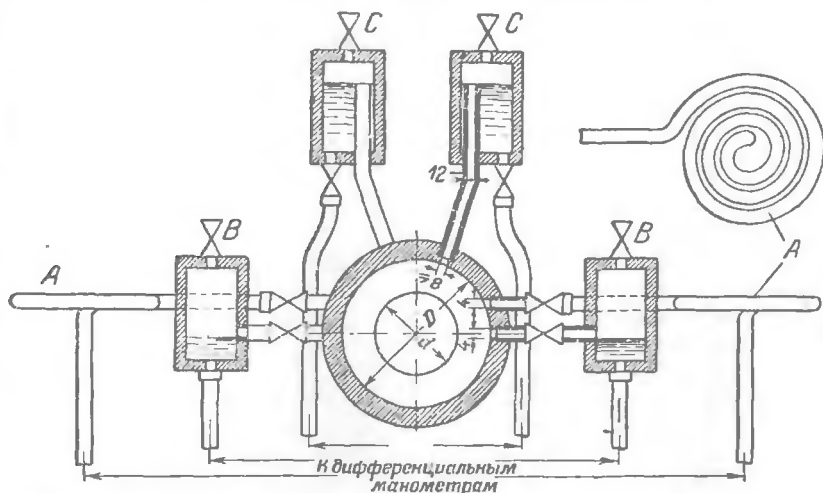
Нормальные сопла



Фиг. 1. Величина прямых участков перед входом и по выходе из дроссельного прибора, необходимых для обеспечения точности измерения при отсутствии тарировки (в кратных числах от диаметра трубопровода D).



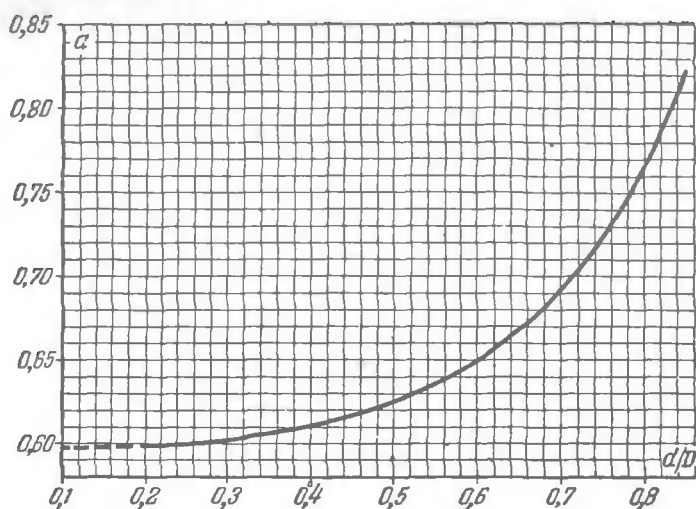
Фиг. 2. Нормальные типы дроссельных приборов.
а—нормальная диафрагма; б—нормальное сопло.



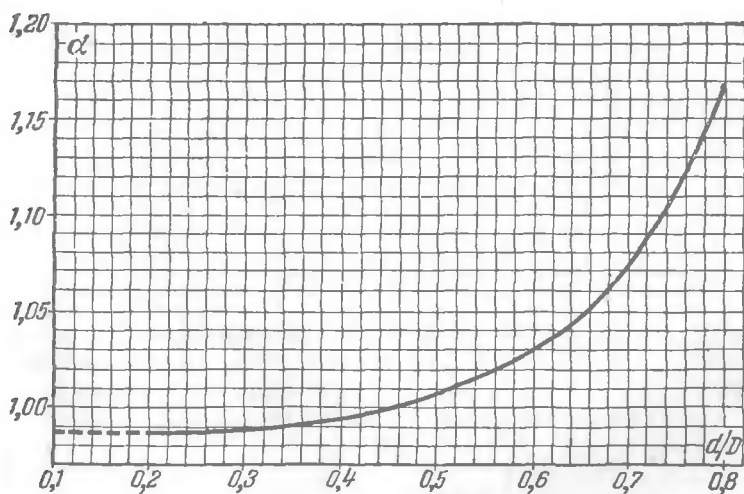
Фиг. 3. Установка различных типов уравнительных приспособлений при измерении расхода пара.

Таблица для определения исходного коэффициента расхода α нормальных диафрагм и сопел

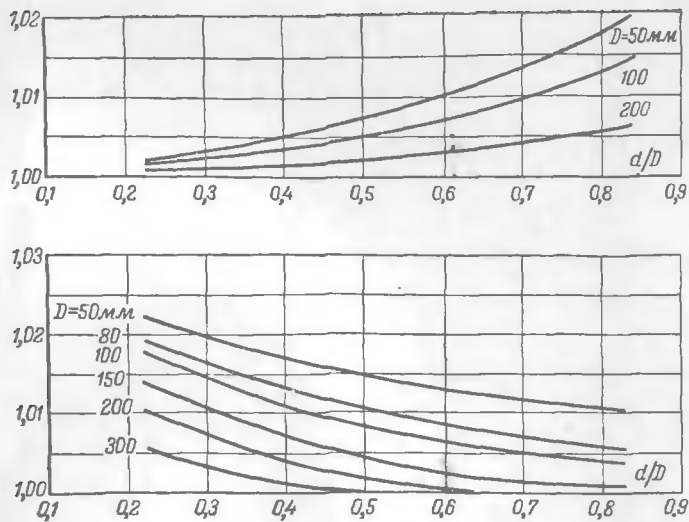
Отношение диаметров d/D	Коэффициент расхода		Отношение диаметров d/D	Коэффициент расхода	
	диафрагма	сопло		диафрагма	сопло
0,2	0,598	0,987	0,55	0,635	1,017
0,25	0,599	0,987	0,6	0,649	1,030
0,3	0,601	0,988	0,65	0,668	1,049
0,35	0,605	0,991	0,7	0,692	1,076
0,4	0,609	0,994	0,75	0,723	1,116
0,45	0,616	0,999	0,8	0,764	1,174
0,5	0,624	1,007	0,85	0,822	—



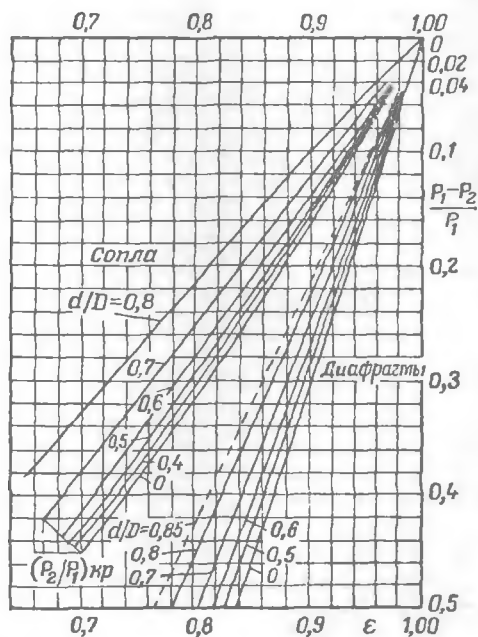
Фиг. 4. Исходный коэффициент расхода α нормальных диафрагм.



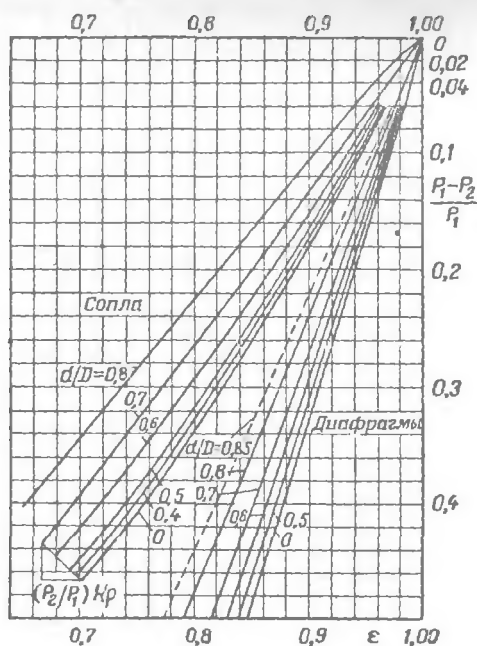
Фиг. 5. Исходный коэффициент расхода нормальных сопел.



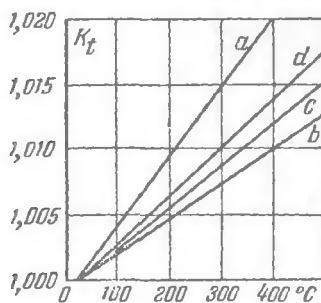
Фиг. 6. Поправка к исходному коэффициенту расхода α на шероховатость трубопровода и недостаточную остроту кромки диафрагмы.



Фиг. 7. Поправочные множители ϵ на расширение для перегретого водяного пара $x=1,31$ при больших перепадах давления.



Фиг. 8. Поправочные множители ϵ на расширение для воздуха и двухатомных газов $\kappa = 1.40$ при больших перепадах давления.



Фиг. 9. Поправка K_t на расширение дроссельного прибора в зависимости от его температуры.

a — алюминий; b — сталь; c — инвель;
 d — медь.